

Tesis de grado para optar el título de Máster en Ingeniería Civil

Influencia del porcentaje de finos en la permeabilidad de materiales areno-arcillosos

Carolina Hurtado Osorio,

I.C., M.Sc.

Director

William Mario Fuentes Lacouture

I.C, M.Sc, Ph.D

Diciembre de 2017

Fundación Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



Tabla de contenido

1	TABLA DE ILUSTRACIONES	3
2	RESUMEN	8
3	INTRODUCCIÓN	10
4	OBJETIVOS	12
4.1	Objetivo general	12
4.2	Objetivos específicos	12
5	MARCO TEÓRICO	13
6	PLAN EXPERIMENTAL	27
6.1	Metodología en el Laboratorio	27
6.2	Materiales	27
6.3	Ensayo de permeabilidad de cabeza constante	34
6.4	Celda de Rowe	36
7	RESULTADOS	51
7.1	Ensayo de permeabilidad de cabeza constante	51
7.2	Ensayo para determinar la permeabilidad de Caolín en la celda de Rowe – Hidrocom	53
7.3	Lavado de finos	55
8	SIMULACIONES NUMÉRICAS CON MEZCLAS ARENO-ARCILLOSAS	61
8.1	Desarrollo de subrutina para generar campo aleatorio de porcentaje de finos	62
8.2	Descripción del problema simulando el ensayo de permeabilidad	62
8.3	Descripción del problema simulando flujo alrededor de tablestaca	64
8.4	Resultados	65
9	CONCLUSIONES	74
10	BIBLIOGRAFIA	75
11	ANEXOS	79
11.1	Protocolo celda de Rowe – hidrocom	79
11.2	Ensayos caracterización de arena	88
11.3	Ensayos caracterización de caolín	89
11.4	Ensayo permeámetro de cabeza constante	90
11.5	Ensayo celda de Rowe	91
11.6	Lavado de finos	94
11.7	Modelación numérica	96

1 TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Variación de la permeabilidad (Hydraulic conductivity) respecto al contenido de material cohesivo (Belkhatir, Schanz, Arab, Della, & Kadri, 2014) 16

Ilustración 2 Permeabilidad vs. Relación de vacíos (Deng et al., 2017) 19

Ilustración 3 Relación e/e_l y permeabilidad (Deng et al., 2017) 20

Ilustración 4 Relación entre k y e_c/e_{cl} , en donde e_c y e_{cl} corresponde a la relación de vacíos y la relación de vacíos en el límite líquido excluyendo la fracción de arena respectivamente (Nagaraj et al., 1993) 21

Ilustración 5 Diagramas esquemáticos mostrando: (a) MT, (b) VS, y (c) su combinación en una dimensión (Z. Lu & Zhang, 2003). 24

Ilustración 6 Influencia del diámetro medio de partículas en la permeabilidad de los medios porosos CDF para dominios con un diámetro de partícula medio geométrico $D = 50 \mu\text{m}$ y COV diferentes (Li et al., 2005) 25

Ilustración 7 Influencia de la clasificación de partículas en la permeabilidad de los medios porosos CDF para dominios con diámetro geométrico medio de partícula $D = 50 \mu\text{m}$ y COV diferente (Li et al., 2005) 26

Ilustración 8 Tamices y agitador mecánico 29

Ilustración 9 Granulometría según muestra de arena 30

Ilustración 10 Granulometría promedio arena 31

Ilustración 11 Clasificación de suelos según el tamaño de las partículas según el sistema unificado de clasificación de suelos [INVIAS] 31

Ilustración 12 Distribución de tamaño de partícula caolín 33

Ilustración 13 Montaje ensayo de permeabilidad de cabeza constante 35

Ilustración 14 Celda de Rowe 37

Ilustración 15 Diagrama esquemático de la configuración experimental 38

Ilustración 16 Vista general del sistema de la celda de Rowe 39

Ilustración 17 Válvulas suministro de vacío y agua 40

Ilustración 18 Bladder 1 y 2 40

Ilustración 19 Vista detallada tablero perillas suministro de aire 41

Ilustración 20 Interfaces agua aire y manómetro digital 42

Ilustración 21 Colocación piedra porosa sobre base de la celda	43
Ilustración 22 Colocación papel filtro sobre piedra porosa	43
Ilustración 23 Colocación del anillo sobre el O-ring	44
Ilustración 24 Compactación de la muestra de suelo	44
Ilustración 25 Colocación de papel filtro sobre la muestra	45
Ilustración 26 Colocación de piedra porosa superior	45
Ilustración 27 Instalación de segundo O-ring	45
Ilustración 28 Instalación de tornillos grandes en muestra tapada	46
Ilustración 29 Instalación de tornillos pequeños	46
Ilustración 30 Instalación de transductores	47
Ilustración 31 Variación del parámetro de Skempton según la presión de cámara	48
Ilustración 32 Ensayo celda de Rowe (Hidrocom)	49
Ilustración 33 Software celda de Rowe (Hidrocom)	50
Ilustración 34 Permeabilidad vs porcentaje de finos con ensayo de permeámetro de cabeza constante	52
Ilustración 35 Comparación entre permeabilidad calculada por medio de ensayos y regresión empírica	52
Ilustración 36 Variación de la permeabilidad respecto al contenido de caolín con Celda de Rowe	53
Ilustración 37 Ensayo permeabilidad celda de Rowe	54
Ilustración 38 Permeabilidad obtenida mediante ensayo de permeámetro y celda de Rowe	55
Ilustración 39 Ensayo lavado de finos muestra 1	56
Ilustración 40 Concentración (g/cm ³) vs Tiempo (min)-muestra 1	57
Ilustración 41 Concentración (g/cm ³) vs Tiempo (s)-muestra 2	57
Ilustración 42 Concentración (g/cm ³) vs Tiempo (s)-muestra 3	58
Ilustración 43 Medición del lavado de finos	59
Ilustración 44 Colocación de tamiz No. 200 en la celda de Rowe	60
Ilustración 45 Geometría y condiciones de borde para modelo de ensayo de permeabilidad.	63
Ilustración 46 modelo esquemático de simulación de ensayo de permeabilidad (no está a escala).	63

Ilustración 47 Distribución del porcentaje de finos en el problema 1: simulación de un ensayo de permeabilidad. porcentaje de finos promedio de $\mu = 5\%$ y una desviación estándar de $\sigma = F \times \mu = 0.5 \times 5\% = 2.5\%$. 64

Ilustración 48 Geometría y condiciones de borde para modelo de tabla estaca. 64

Ilustración 49 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 2%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 66

Ilustración 50 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =2%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 66

Ilustración 51 Permeabilidad equivalente para cada desviación estándar para porcentaje de finos =2%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 67

Ilustración 52 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 67

Ilustración 53 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 68

Ilustración 54 Permeabilidad equivalente para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 68

Ilustración 55 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 10%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 69

Ilustración 56 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =10%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 69

Ilustración 57 Permeabilidad equivalente para cada desviación estándar para porcentaje de finos =10%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 70

Ilustración 58 Distribución aleatoria de contenido de finos en el modelo de la tabla estaca con porcentaje de finos de $\mu = 5\%$ y factor multiplicador de la desviación estándar de 0.9 70

Ilustración 59 Presión de poros modelo de la tabla pwestaca con porcentaje de finos de 5% y factor multiplicador de la desviación estándar de $F=0.9$ 71

Ilustración 60 Variación del exceso presión de poros $\Delta p_w = p_w - p_w0$ en el modelo de tabla estaca con porcentaje de finos de 5% y factor multiplicador de la desviación estándar de $F=0.9$ 71

Ilustración 61 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 5% Modelo de la tabla estaca. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 72

Ilustración 62 Velocidad promedio normalizad de las 2 simulaciones medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \mu$, en donde μ es el promedio 73

Ilustración 63 Variación de la permeabilidad con la presión-100% Caolín 91

Ilustración 64 Variación de la permeabilidad con la presión-200% Caolín 91

Ilustración 65 Variación de la permeabilidad con la presión-4% Caolín 92

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que con su valiosa colaboración han contribuido de diferentes maneras en la realización de la presente investigación.

Especialmente a PhD. William Mario Fuentes Lacouture, tutor de este trabajo de grado, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa al mismo, pero sobre todo por ser un ejemplo, un gran motivador y un apoyo constante a lo largo de todo el proceso.

De igual manera es importante reconocer el apoyo brindado por varios funcionarios de la universidad en diferentes dependencias de ésta, como el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, los laboratorios de Hidráulica e Ingeniería Mecánica y muy especialmente el equipo completo de trabajo del laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción de la Universidad del Norte.

Y, por último, pero no menos importante debo mencionar a Dios y a mi familia presentes en todo momento.

A todos ellos, muchas gracias.

2 RESUMEN

Las mezclas areno-arcillosas son uno de los suelos más comunes en la ingeniería geotécnica. Estos suelos presentan una permeabilidad que dependen mayormente de su contenido de finos, de la presión de confinamiento y de la distribución espacial del contenido de finos. Esta dependencia se puede complicar si se considera la migración de finos debido al flujo de agua. Existen diferentes métodos para realizar los ensayos de permeabilidad: el método más empleado corresponde a los permeámetros convencionales. Estos aparatos lamentablemente no garantizan la saturación de la muestra, en especial cuando contiene un porcentaje de finos, y tampoco controlan la presión de confinamiento de la muestra. Existen equipos más sofisticados sin estas limitaciones, por ejemplo, la Celda de Rowe, también llamado Hidrocom, que cuenta con un sistema de contrapresión para la saturación de muestra y un pistón para ejercer presión de confinamiento. Esta investigación busca comparar los resultados de permeabilidad en materiales areno – arcillosos obtenidos en un permeámetro de cabeza constante contra los adquiridos con una celda de Rowe. Para tal fin, se mezcla arena de Santo Tomas, Atlántico y una arcilla caolín en distintas proporciones. Con estos resultados, se evalúa la dependencia de la permeabilidad con respecto al porcentaje de finos. Se realizan además ensayos para cuantificar la migración de finos ante un gradiente hidráulico, y se realizan simulaciones numéricas en elementos finitos para medir la dependencia de la permeabilidad con la distribución espacial de los finos.

ABSTRACT

Sand-clay mixtures are one of the most usual types of soils in the geotechnical engineering. These soils present a permeability depending primarily on the fine content, the confinement pressure and the spatial distribution of the fine content. This dependence can be complicated if we consider fine migration phenomena due to the water flow. There exist different methods to measure the permeability of sand-clay mixtures. Permeameters may be the most popular equipment for this purpose. However, this equipment does not guarantee the complete saturation of the sample, especially when dealing with samples having a significant fine content. It neither considers the confinement pressure. More sophisticated equipment for permeability measurement can guarantee complete saturation of samples through back-pressure procedures and inner pressure confinement. An example of them is the Rowe's cell, also called Hidrocom, which similar to the triaxial apparatus, permits to control the degree of saturation through the computation of the parameter B of Skempton. In addition, it allows to apply confinement pressure on the sample. In this work, results of permeability tests of a sand-clay mixture obtained from permeameter tests and Rowe's cell tests are compared. For this purpose, the Santo-Tomás sand together with a Kaolin clay are mixed with different proportions. With the results, the permeability dependence with the fine content is evaluated. Additional tests to measure the fine migration due to a hydraulic gradient are also conducted. Finally, some numerical simulations to evaluate the permeability dependence with the spatial distribution of the fine content are performed.

3 INTRODUCCIÓN

La permeabilidad en un suelo es esencial para analizar distintos fenómenos en la ingeniería geotécnica. Su importancia radica en que relaciona la velocidad del flujo de agua subterránea ante un gradiente hidráulico impuesto. Según este concepto, un suelo permeable se define como aquel que permite una velocidad alta de infiltración de agua para un gradiente hidráulico dado. Esta variable depende de varios factores, entre ellos, el tamaño de los poros interconectados, la distribución espacial de estos poros (heterogeneidad) y algunas propiedades del fluido (viscosidad y temperatura). Este concepto permite estimar diversos efectos en la ingeniería geotécnica, por ejemplo, tiempo de consolidación para estimación de asentamientos en estructuras, caudales de infiltración en presas y excavaciones, condiciones de drenaje del suelo, susceptibilidad a la licuefacción, entre muchos otros.

Hoy en día se conoce que los suelos de agregados finos (limos y arcillas) presentan permeabilidades muy bajas y suelos de agregados gruesos (arenas y gravas) presentan permeabilidades muy altas. **Mezclas entre estos materiales pueden resultar en otra permeabilidad que se debe estimar.** Para su determinación, se requieren aparatos capaces de medir la permeabilidad. El método más convencional es la medición de la permeabilidad con permeámetro. Este es un equipo capaz de imponer un gradiente hidráulico a una muestra de dimensiones conocidas y calcular la permeabilidad relacionando el gradiente hidráulico con la velocidad de flujo de salida. Sin embargo, este equipo presenta varias limitaciones: no tiene control para medir el grado de saturación del material, no presenta sistema para ejercer presión de confinamiento y el gradiente hidráulico tiene limitaciones debido a que se ejerce con gravedad de columna de agua. Por otro lado, equipos más sofisticados como el hidrocom no presentan estas limitaciones. Este equipo, puede saturar la muestra con un sistema de contrapresión muy similar a los triaxiales. El grado de saturación se puede controlar con el cálculo del parámetro B de Skempton. Además, permite la aplicación de un esfuerzo de confinamiento por medio de un pistón vertical conectado a un sistema hidráulico de presión. Finalmente, permite la imposición de gradientes hidráulicos superiores debido a que el equipo trabaja con sistemas hidráulicos. No hay duda, que el equipo ofrece ventajas para medir de manera más exacta la permeabilidad del suelo.

A través de este estudio, se pretende hacer una comparación de la variación de la permeabilidad de mezclas areno-arcillosas con ensayos de permeabilidad utilizando permeámetros convencionales y la celda de Rowe. Se pretende además cuantificar los efectos que podría tener el porcentaje de finos sobre su permeabilidad. El estudio incluye unos ensayos experimentales que intentan cuantificar la migración de finos ante un gradiente hidráulico impuesto, y determinar si esta migración es relevante o no. Finalmente, se estudia la influencia de la distribución espacial de los finos sobre la

permeabilidad, asumiendo distribuciones espaciales del contenido de finos, por medio de simulaciones numéricas con elementos finitos. La celda de Rowe empleada fue la adquirida por la Universidad del Norte para el laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción. Previo a los ensayos, se debió realizar un trabajo de calibración de cada uno de sus componentes y se protocolizaron los procedimientos ejecutados dentro de este estudio. Adicional a esto, el presente trabajo incluye una revisión de literatura enfocada en investigaciones previas relacionadas con la permeabilidad de los suelos, su variación debido al contenido de finos presente en éstos y el lavado de finos.

Este documento se estructura de la siguiente manera: inicialmente se describe la revisión de la literatura encontrada acerca de los temas relevantes para el desarrollo de la investigación. Seguidamente se detalla el plan experimental, con la metodología empleada en el laboratorio para realizar los ensayos, descripción y caracterización de los materiales empleados, al igual que el ensayo de permeabilidad y los equipos utilizados; como el permeámetro tradicional y la Celda de Rowe.

Para concluir se hace la descripción de los resultados obtenidos con las diferentes metodologías utilizadas, se simula y calibra el ensayo de permeabilidad para suelo no homogéneo. Se presentan las conclusiones encontradas incluyendo un capítulo de anexos con el protocolo detallado que servirá como guía práctica para el uso adecuado de la Celda de Rowe en futuras investigaciones en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción de la Universidad del Norte. También se muestran aquí, las tablas de los ensayos ejecutados y los códigos de programación empleados para la modelación numérica.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la influencia del contenido finos sobre la permeabilidad de materiales areno-arcillosos para distintas proporciones de finos.

4.2 Objetivos específicos

- Poner en funcionamiento el equipo Celda de Rowe-Hidrocom adquirido por la Universidad del Norte.
- Realizar ensayos con el permeámetro para distintas mezclas areno-arcillosas.
- Comparar los resultados obtenidos con el equipo Celda de Rowe-Hidrocom con aquellos del permeámetro.
- Cuantificar la migración de finos para distintos gradientes hidráulicos con los equipos permeámetros y celda de Rowe-Hidrocom.
- Evaluar mediante simulaciones numéricas con elementos finitos la influencia de la distribución espacial del contenido de finos en la permeabilidad equivalente de un suelo.

5 MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta la revisión de la literatura que incluye varios conceptos teóricos relevantes para el presente estudio y un análisis de algunas contribuciones científicas relacionadas con el comportamiento hidráulico de mezclas areno-arcillosas.

La permeabilidad es una de las propiedades importantes y complejas en los suelos ya que está controlada tanto por las propiedades del suelo como del fluido permeable (DeGroot, Ostendorf, & Judge, 2012). Entre estos factores se incluye la viscosidad del fluido, la distribución de tamaños de poro, la distribución de tamaños de las partículas, la relación de vacíos y textura del suelo. La viscosidad y el peso unitario del agua se consideran para efectos de análisis geotécnicos como constantes, asumiendo una misma temperatura. Las aplicaciones de esta propiedad incluyen la determinación de los tiempos de consolidación de suelos saturados, la estabilidad de taludes debido al flujo por infiltración de agua, el diseño de filtros y subdrenajes (Das, 2001), entre otros. De igual manera, influye en las cantidades de infiltración a través de presas de tierra, diques y otras obras de tierra.

Los suelos son permeables al agua debido a que los vacíos entre las partículas se encuentran conectados entre sí. El grado de permeabilidad se encuentra caracterizado por un coeficiente de permeabilidad k . Se ha determinado que el valor de la permeabilidad varía dependiendo el tipo de suelo cuyos rangos aproximados se muestran en la Tabla 1. Algunos autores consideran a la permeabilidad como una de las cuatro propiedades del suelo con mayor variación (Jabro, 1992).

Generalmente, este coeficiente se mide con ensayos en el laboratorio, entre ellos, el ensayo de cabeza constante para suelos con alta permeabilidad, como las arenas y cabeza variable para suelos con media o baja permeabilidad como lo son los limos y las arcillas (Bardet, 1997). Otros ensayos como el ensayo de Rowe y la prueba de bombeo también son útiles para la determinación del coeficiente de permeabilidad y serán descritos posteriormente. Todos estos ensayos se fundamentan en la ley de Darcy, que es una ecuación deducida de manera empírica a través de observaciones relativas al flujo de agua a través de arenas limpias, la cual sostiene que la velocidad de descarga es proporcional al gradiente hidráulico y a un coeficiente de permeabilidad. La ecuación de Darcy corresponde a la siguiente relación:

$$v = k i \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

k = coeficiente de permeabilidad (m/s)

$i = \text{gradiente hidráulico} = h/L \quad (-)$

$h = \text{diferencia de cabezas hidráulicas entre la parte inicial y final de la muestra (m)}$

$L = \text{longitud de la muestra a través de la cual se mide } h \text{ (m)}$

La ley de Darcy permite calcular el caudal Q como la velocidad de descarga v multiplicada por el área de la sección transversal A de la masa de suelo en consideración, i.e. $Q = v A$.

Los ensayos de permeabilidad presentan un porcentaje de error considerable. Esto se debe a diversas razones, por una parte, estos dependen en gran medida de la calidad de la muestra en cuanto a su nivel de perturbación (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2011). La precisión de los resultados de los ensayos de permeabilidad dependerá de qué tan representativa sea la estructura y densidad de las muestras de suelo de su estado natural en campo (DeGroot et al., 2012). Esto es una tarea sumamente difícil considerando que no se pueden obtener muestras inalteradas de suelos granulares. Adicionalmente, la orientación de los estratos con respecto al flujo de agua en campo no es necesariamente la misma que se ensaya en el laboratorio, por ejemplo, para algunos materiales la relación entre el flujo horizontal y el flujo vertical es igual o superior a 3. Pero esta relación no se mantiene generalmente en el laboratorio y las arcillas debido sus posibles fisuras causadas por su la elaboración de la muestra dentro del permeámetro. El autor (Bowles, 1981) agrega que las condiciones de frontera en el laboratorio son distintas puesto que los moldes presentan paredes lisas las cuales alteran los caminos de flujo con respecto a los que tendrían en condiciones naturales. A esto se suma dos fuentes de errores importantes: a) el hecho que no se puede garantizar la completa saturación de la muestra, debido a la aparición de pequeñas burbujas de aire y b) el esfuerzo de confinamiento de la muestra es distinto al real, y de hecho, en la realidad puede estar sujeta a esfuerzos de confinamiento muchos mayores.

Tabla 1 Valores típicos de permeabilidad para suelos saturados (Das, 2001)

Soil type	Permeability k (cm/s)
Clean gravel	100-1
Coarse sand	1-0,01
Fine sand	0,01-0,001
Silty clay	0,001-0,00001
Clay	<0,000001

Además de los ensayos, se han realizado modelos que puedan estimar la permeabilidad teniendo en cuenta el tipo de suelo. De manera general, se puede afirmar que la permeabilidad depende primordialmente de la granulometría y en segundo lugar de la relación de vacíos (o densidad seca) del material (Alyamani & Şen, 1993; Chapuis, 2004;

Hazen, 1911; Kenney, Lau, & Ofoegbu, 1984; Loudon, 1952; Odong, 2007). La distribución de tamaño de partículas granulares de suelo afecta esta propiedad. Existen distintas maneras de caracterizar un suelo granular de acuerdo con su distribución de tamaño de partícula. Generalmente, se hace uso de coeficientes como; el coeficiente de uniformidad (C_u), el coeficiente de curvatura (C_c), tamaños de partícula, D_{10} , D_{30} y D_{60} , donde D_{10} , D_{30} y D_{60} representan los tamaños de partícula correspondiente al 10%, 30%, y 60% de finos respectivamente (Das, 2001).

Según algunos autores, la relación de vacíos presenta una relación con la permeabilidad con una función logarítmica-lineal (Al-Tabbaa & Wood, 1987; Mesri & Olson, 1971; Nagaraj, Pandian, & Raju, 1994; Tavenas, Leblond, Jean, & Leroueil, 1983; Taylor, 1948; Yang & Aplin, 1998, 2007). No obstante, estas relaciones solo han sido demostradas para tipos específicos de suelos así que su aplicación aún se encuentra limitada para los demás tipos. Park (2011) propuso recientemente un modelo con redes neuronales artificiales (del inglés "*artificial neural network, ANN*"), demostrando que podía ser utilizado para estimar valores del coeficiente de permeabilidad. Esto lo hizo modelando una función la cual incluye seis variables, entre las que se encuentra el contenido de humedad, la gravedad específica y el tamaño de partícula. Considerando la influencia de la presencia de gravas en la permeabilidad de mezclas granulo-arcillosas (Indrawan, Rahardjo, & Leong, 2006; Shafiee, 2008; Shakoor, A., Cook, 1990; Shelley & Daniel, 1993), se presume que el contenido de arcillas pueda posiblemente estar relacionada de manera directa con la permeabilidad de las arcillas fangosas. En una investigación mostraron que el contenido de arcilla, el cual se define como la fracción en masa de las partículas cuyo diámetro sea menos a $2\text{ }\mu\text{m}$, fue un factor determinante en la definición de la relación entre la permeabilidad y la relación de vacíos (Yang & Aplin, 2010). Por otra parte, en un estudio realizado (Shakoor, A., Cook, 1990) demostraron que para contenidos de material granular menores al 50%, la permeabilidad permanece en un rango entre $1\text{,E-}09$ y $2\text{,E-}09\text{ m/s}$. Así pues, para incrementos de material granular mayores al 50% la permeabilidad podría alcanzar un valor de $1\text{,E-}04\text{ m/s}$.

En el año 2014 un estudio fue realizado mediante el cual se pretendió determinar la afectación de la permeabilidad y la presión de poros de muestras de arena-limosa causada por el porcentaje de finos y la relación de vacíos (Belkhatir, Schanz, Arab, & Della, 2014). Se realizaron ensayos de permeámetro de pared flexible y triaxiales monotónicos en muestras de arena con 0, 10, 20, 30, 40 y 50% de limos con baja plasticidad a un esfuerzo efectivo de confinamiento de 100 kPa y dos densidades relativas (D_r) de 20 y 91% como se muestra en la Ilustración 1. Encontraron que la presión de poros incrementa de manera lineal con el incremento en el contenido de finos y logarítmicamente el incremento de la relación de vacíos intergranulares. Los resultados obtenidos en este estudio revelaron que la permeabilidad saturada (k) de arena mezcla con 50% de material cohesivo con baja permeabilidad puede ser, en promedio, 4 órdenes de magnitud por debajo del de la arena limpia, es decir, sin material cohesivo. Así también, determinaron que la permeabilidad disminuye de manera hiperbólica con el incremento de contenido de material cohesivo y la relación de vacíos intergranulares.

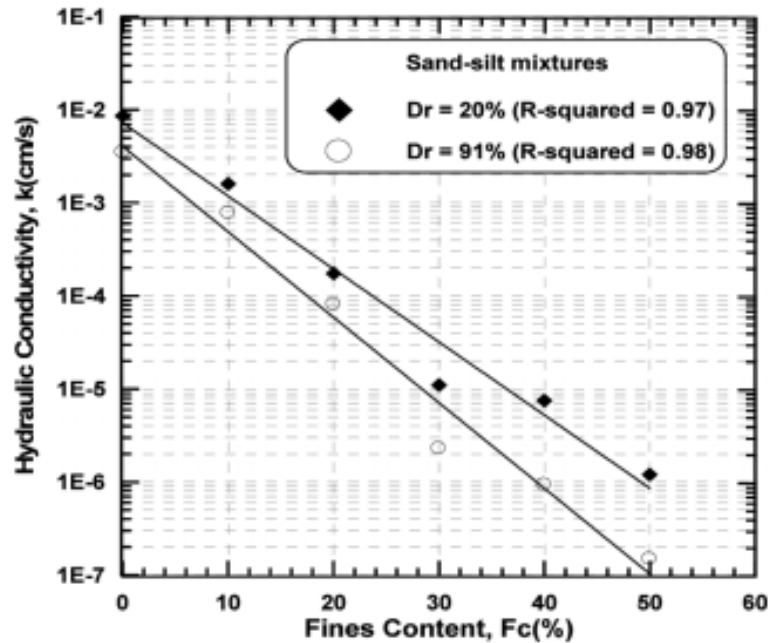


Ilustración 1 Variación de la permeabilidad (Hydraulic conductivity) respecto al contenido de material cohesivo (Belkhatir, Schanz, Arab, Della, & Kadri, 2014)

Se realizó un estudio donde obtuvieron resultados para distintas relaciones de finos-gruesos y su influencia sobre los esfuerzos de confinamiento y la permeabilidad (Shafiee, 2008). En la Tabla 2 se considera el tipo de mezcla, la relación de vacíos después de la compactación (e_{com}), la relación de vacíos después de la consolidación (e), la relación de vacíos de la fracción de arcillas (e_c) y la permeabilidad en la dirección vertical (k_v) para esfuerzos efectivos de confinamiento (p') de 30, 100 y 300 kPa. Seguidamente se muestra que la relación de vacíos de la fracción de arcilla e_c aumenta continuamente con el aumento en el contenido de los gránulos; e_c fue definida como la razón entre la relación de vacío y cc que es el contenido de arcilla de la mezcla como se muestra en la Ecuación 2.

$$e_c = \frac{e}{cc} \quad \text{Ecuación 2}$$

Las arcillas se pueden clasificar teniendo en cuenta su pureza como magras o grasas, conteniendo el primer término la mayor cantidad de impurezas y el segundo el menor. Para las mezclas de arcilla grasa con material granular en las que las características físico-químicas de la arcilla juegan un papel importante en el control de la permeabilidad, se puede decir que se utiliza este tipo de arcilla debido a su pureza. Se concluyó según un estudio realizado que en mezclas de arcilla grasa-material granular, el aumento en el contenido de material granular aumentará la permeabilidad (Shafiee, 2008). Esto se puede

ver explicado en que la relación de vacíos controla la permeabilidad cuando la fracción cohesiva de las mezclas presenta baja plasticidad mientras que la relación de vacíos de la fracción cohesiva controla la permeabilidad cuando su plasticidad es alta (Shafiee, 2008).

Tabla 2 Propiedades de mezclas de agregado-arcilla grasa (Shafiee, 2008)

Mezcla	p' (kPa)	e_{com} (-)	e (-)	e_c (-)	$k_v, E - 09$ (m/s)
Arcilla grasa	30		0.432	0.432	11.1
	100	1.031	0.375	0.375	8.7
	300		0.282	0.282	6.6
20% Arena-80% Arcilla grasa	30		0.408	0.51	11.9
	100	0.908	0.326	0.408	9.1
	300		0.258	0.322	7.2
20% Grava-80% Arcilla grasa	30		0.411	0.514	12
	100	0.908	0.329	0.411	8.9
	300		0.26	0.325	7.2
40% Arena-60% Arcilla grasa	30		0.284	0.473	17.5
	100	0.726	0.257	0.428	14.1
	300		0.23	0.383	11.4
40% Grava-60% Arcilla grasa	30		0.288	0.48	17
	100	0.726	0.261	0.435	10.9
	300		0.223	0.372	8.4
60% Arena-40% Arcilla grasa	30		0.281	0.703	165
	100	0.584	0.263	0.658	28.6
	300		0.233	0.583	24.5
60% Grava-40% Arcilla grasa	30		0.269	0.673	89.5
	100	0.584	0.248	0.62	17.2
	300		0.203	0.508	16.3

De igual manera, el contenido de finos es un factor de gran influencia sobre la permeabilidad del suelo. La dinámica de la acumulación de estos se puede dividir en cuatro etapas: en la primera se produce un depósito superficial en el cual se evidencia una reducción considerable en la permeabilidad, en la segunda se da una formación de puentes con las partículas, reduciéndose aún más la permeabilidad; en la tercera se da una

acumulación interna de partículas, dando lugar a la generación de una costra interna; y en la cuarta se genera una costra externa (Roque et al., 1995).

Deng et al. Realizaron un estudio preparando una mezcla de arena y arcilla para simular algunos tipos de suelos con gradaciones discontinuas (Deng, Wu, Cui, Liu, & Wang, 2017). En este se llevaron a cabo pruebas incrementales de carga del edómetro para investigar sus comportamientos hidromecánicos. Los resultados se analizaron primero con base en las gráficas en los planos semi-logarítmicos; las mezclas de suelo utilizadas se describen en la Tabla 3. En esta se comparan los valores del límite líquido (w_l), gravedad específica de la arena (d_{sc}), de la arcilla (d_{ss}) y de la mezcla (d_{sm}) mediante el método de peso promedio teniendo en cuenta distintas proporciones de bentonita-caolín (por sus iniciales en inglés “bentonite-kaolin”, B/K). Se propuso que la relación de vacíos normalizada en el límite líquido permite una normalización valiosa y confiable de las curvas de compresibilidad y permeabilidad. Para investigar la influencia de la fracción de arena, se introdujo un modelo de cuatro fases de mezcla arena-arcilla, que permite determinar las proporciones de vacío de arcilla y arena. Cuando el esqueleto de arena se formó parcialmente, la tensión vertical fue parcialmente soportada por el esqueleto lo que resultó en un comportamiento de compresión diferente al de las arcillas comunes. Se descubrió que la formación parcial del esqueleto depende de la dimensión relativa de los granos gruesos a los finos, así como del estado de esfuerzos. Esto implica que durante la compresión, la interacción entre la arena y la arcilla evoluciona desde un esqueleto de arena no parcial a completo hasta llegar al final de la relación máxima de vacío de arena.

Tabla 3 Propiedades de las mezclas de arena-arcilla (Deng et al., 2017)

B/K	w_c (%) ^a	Liquid limit w_l (%)	Specific gravity d_{sm}	Specific gravity d_{sc}	Specific gravity d_{ss}
9/1	50	98.5	2.696	2.75	2.66
9/1	60	127.7	2.705	2.75	2.66
9/1	70	155	2.714	2.75	2.66
9/1	100	260	2.75	2.75	–
7/3	50	84.6	2.688	2.73	2.66
7/3	60	106.3	2.695	2.73	2.66
7/3	70	123.7	2.702	2.73	2.66
7/3	100	198.4	2.73	2.73	–
5/5	50	68.8	2.676	2.70	2.66
5/5	60	85.5	2.68	2.70	2.66
5/5	70	101.2	2.684	2.70	2.66
5/5	100	157.2	2.70	2.70	–

^a w_c (%) stands for the clay content in the mixtures. $w_c = 100\% - w_s$.

La conductividad hidráulica se estimó siguiendo la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi, la cual se encuentra en la Ecuación 3.

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

k = Permeabilidad

c_v = Coeficiente de consolidación determinado por el método de Taylor

m_v = Coeficiente de cambio de volumen

γ_w = Peso unitario del agua

El mismo método también fue considerado por (Sivapullaiah, Sridharan, & Stalin, 2000; Watabe, Yamada, & Saitoh, 2011). Se encontró que cuando el contenido de arena era menor al 50%, el valor de k obtenido por este método es consistente con el de la prueba de permeabilidad de cabeza variable (Watabe et al., 2011). También se observó que la fracción de arena afecta significativamente a la permeabilidad, la cual aumenta con el incremento de la fracción de arena a una relación de masa dada (B/K) y una relación de vacíos. Además, el k disminuye con el aumento de la proporción másica de bentonita a caolín en una determinada proporción de arena y proporción de espacios vacíos. Esto sugiere que el diámetro de los canales de flujo depende de la mineralogía de la arcilla (Deng et al., 2017).

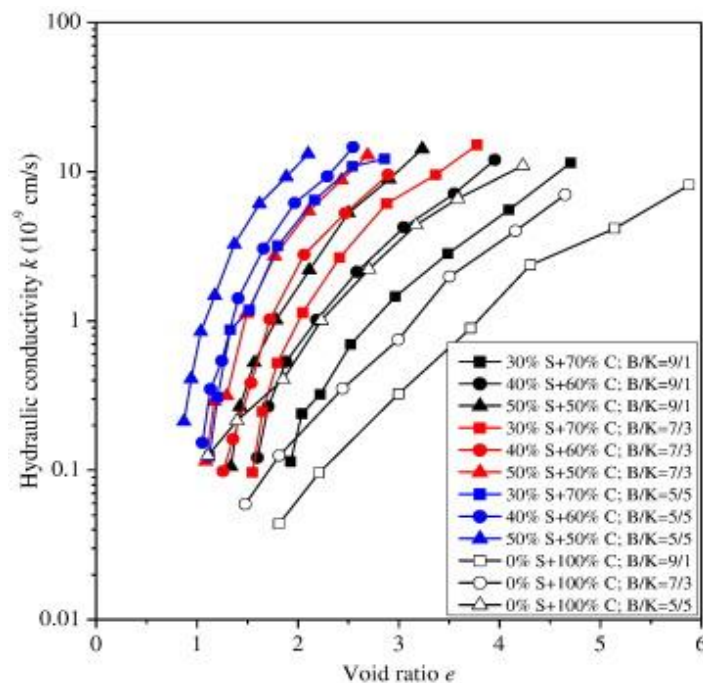


Ilustración 2 Permeabilidad vs. Relación de vacíos (Deng et al., 2017)

La Ilustración 2 muestra cambios de conductividad hidráulica (k) con relación de vacíos (e). Se observa que la fracción de arena afecta significativamente a la permeabilidad, que aumenta con el aumento de la fracción de arena a una relación de masa dada (B/K) y relación de vacíos. Además, la permeabilidad disminuye con el aumento de la proporción másica de bentonita a caolín en una determinada proporción de arena y proporción de

espacios vacíos. Esto sugiere que el diámetro de los canales de flujo depende de la mineralogía de la arcilla (Deng et al., 2017).

El índice (e/e_l) también se utilizó en el estudio (Deng et al., 2017) para analizar cuantitativamente el comportamiento de permeabilidad de estos suelos donde e_l es la relación de vacíos en el límite líquido y e es la relación de vacíos. La Ilustración 3 revela una relación lineal entre k y e_l para los suelos cohesivos, de acuerdo con las observaciones de Nagaraj y Srinivasa Murthy (Nagaraj, Pandian, & Narashimha Raju, 1993). Por el contrario, se identifica una relación exponencial para los suelos con arena como se expresa en la Ecuación 4.

$$\frac{k}{10^{-9} \left(\frac{cm}{s} \right)} = -1,65 + 1,75 \exp\left(\frac{e}{e_l} - 0,34\right)/0,27 \quad \text{Ecuación 4}$$

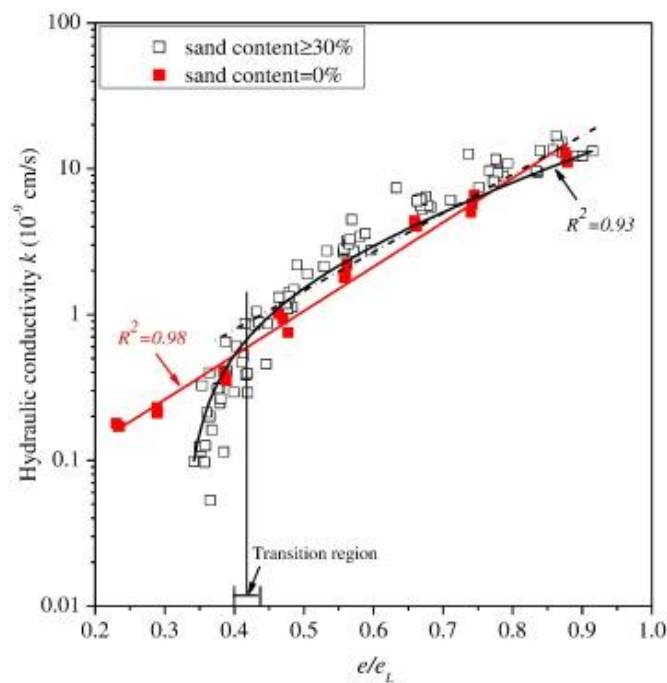


Ilustración 3 Relación e/e_l y permeabilidad (Deng et al., 2017)

En el estudio fue posible determinar que la presencia de material fino tiene influencia en el comportamiento de la permeabilidad de un suelo. De esta manera, se muestra en la Ilustración 3 el comportamiento de esta propiedad para suelos tanto con material fino como sin este. En el estudio fue posible determinar que la presencia de material fino tiene influencia en el comportamiento de la permeabilidad de un suelo. De esta manera, se muestra en la Ilustración 3 el comportamiento de esta propiedad para suelos tanto con material fino como sin este. El autor propone que esto puede estar causado por un sistema

compuesto conformado por partículas de arena impenetrables y arcilla con poros permeables los cuales se tienen en cuenta en la variable, e_c (Deng et al., 2017). La relación entre k y e_c/e_{cl} se establece en la Ilustración 4, aclarando así la variación de la permeabilidad con respecto a estas variables. En otro estudio fue posible identificar una variación similar para suelos con poca presencia de material granular (Nagaraj et al., 1993) como se puede observar en la Ilustración 4, evidenciando así una tendencia similar entre los datos empíricos de Deng et al. y la correlación empírica de Nagaraj et al..

La marcada tendencia en ambos estudios demuestran que el comportamiento de la filtración de suelos con presencia de material granular puede ser considerado como un de arcillas comunes cuando se utilice un modelo de cuatro fases y se implemente la relación e_c/e_{cl} donde e_c es la relación de vacíos excluyendo la fracción de arena y e_{cl} es la relación de vacíos en el límite líquido excluyendo la fracción de arena (Deng et al., 2017).

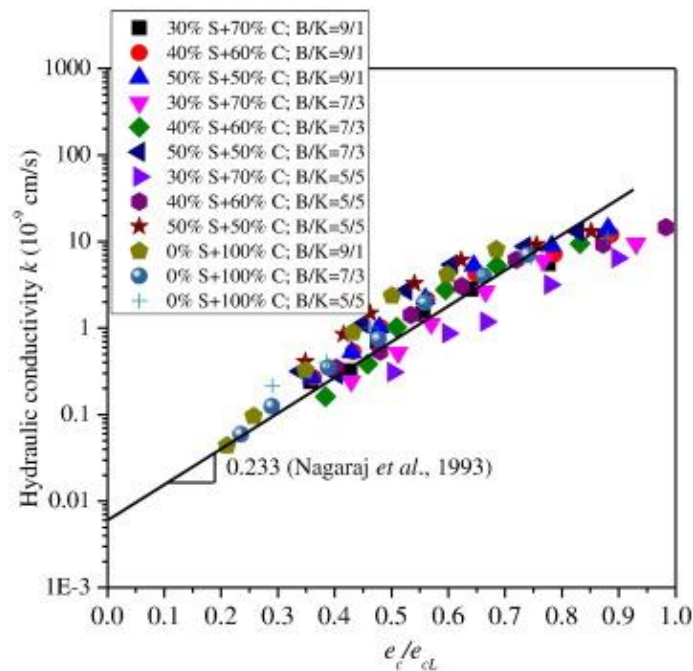


Ilustración 4 Relación entre k y e_c/e_{cl} , en donde e_c y e_{cl} corresponde a la relación de vacíos y la relación de vacíos en el límite líquido excluyendo la fracción de arena respectivamente (Nagaraj et al., 1993)

Otra investigación pretende determinar el efecto de la presencia de dos clases material fino, uno proveniente de rocas y otro arcilloso, en las propiedades de mezclas de suelos para capas de base no estabilizadas. Se determinó que en la presencia de menos del 5% por masa de material fino de origen rocoso se obtiene una permeabilidad satisfactoria, no obstante, se considera que en presencia de material fino de origen arcilloso se presenta un efecto adverso sobre esta propiedad ocasionando problemas de drenaje (Babić, Prager, & Rukavina, 2000).

Uno de los efectos que pueden afectar al comportamiento de la permeabilidad durante el flujo de agua corresponde a la erosión por sufusión del contenido de arcilla en mezclas

areno-arcillosas. Los mecanismos internos de erosión son complejos e involucran muchos parámetros. La sufusión de la arcilla se caracteriza por una redistribución interna de las partículas finas dentro del suelo y puede ir acompañada de una disminución de la permeabilidad. La “tubificación”, por otro lado, es inducida por una erosión regresiva de las partículas del suelo aguas abajo y a lo largo de la línea aguas arriba hacia un ambiente exterior hasta la formación una tubería continua. La distribución de tamaño de partícula varía según el aumento en la permeabilidad. La iniciación de este último mecanismo es difícil de detectar y, a diferencia del mecanismo de sufusión, evoluciona muy rápidamente.

Bajo el efecto de los flujos internos, el suelo puede experimentar un lavado de partículas modificando la distribución de su tamaño, así como también, afectando sus características hidráulicas, químicas y mecánicas. En un estudio realizado en el Instituto de Investigación de Ingeniería Civil y Mecánica GeM, Universidad de Nantes IUT Saint-Nazaire en Francia, se discutieron los efectos de los flujos internos en una mezcla de arena con caolín, en términos de la velocidad de erosión y modificación de la permeabilidad. En este se realizó un estudio paramétrico con un dispositivo de tres triaxiales modificados. Estos triaxiales permiten la consolidación isotrópica y el confinamiento de las muestras detectando grandes deformaciones de la muestra. Los ensayos revelaron que la erosión de arcilla se acompaña de una obstrucción en la muestra que induce una caída en la conductividad hidráulica. Para gradientes altos, la erosión de la arcilla está acompañada por la erosión regresiva la arena y finalmente la muestra colapsa. La tasa de erosión depende de los valores de los diferentes parámetros considerados entre los que se incluye el gradiente hidráulico, contenido de arcilla y tamaño de abertura del poro del filtro (Marot, Bendahmane, Rosquoet, & Alexis, 2009).

La combinación de arenas con arcillas es usada con frecuencia como material de revestimiento y como material de núcleo en estructuras de tierra. Dentro de estas estructuras, los flujos de infiltración internos pueden generar el arrastre y el transporte de algunas partículas. Esta migración de partículas debido a interflujos hidráulicos, denominada erosión interna, puede modificar las propiedades estructurales hidráulicas y mecánicas. La conductividad del material, por ejemplo, sufre algunos cambios bruscos, que causan pérdidas de tensión o sobrepresiones intersticiales. Por lo tanto, el diseño de las estructuras de tierra debe tener en cuenta los efectos de la erosión interna sobre la permeabilidad. La erosión interna se define como la migración de la fracción fina a través de los espacios porosos de un suelo, producto de flujos de filtración. Puede ser definida también, como la inhabilidad de la parte gruesa del suelo de retener o prevenir la migración o movimiento de la fracción fina del suelo, debido a flujos de filtración (Moffat & Fannin, 2006).

Muchos parámetros (porosidad, tamaño de grano, presión de confinamiento, gradiente hidráulico) influyen en el comportamiento de la erosión interna. Diferentes criterios para evaluar la iniciación y el desarrollo de la erosión interna se proponen en la bibliografía (Kenney et al., 1984; Khilar, Fogler, & Gray, 1985). En su mayoría se basan en el análisis del

tamaño de partícula del material o en la estimación del gradiente hidráulico crítico de la erosión.

Para caracterizar el inicio de la erosión interna, muchos autores han desarrollado algunas expresiones del gradiente hidráulico crítico. Algunas de estas expresiones dependen fuertemente de la configuración específica estudiada y, por lo tanto, no se pueden aplicar en general. Con respecto a los suelos cohesivos (Khilar et al., 1985), el gradiente crítico de erosión se expresa como una función del esfuerzo cortante hidráulico τ (esfuerzo cortante generado por flujos dentro del sistema poroso del suelo), de la permeabilidad intrínseca K y de la porosidad n . La dificultad principal, cuando se utiliza este modelo, radica en la determinación de τ , que depende tanto de la mineralogía de la arcilla como de las propiedades del fluido intersticial (Arulanandan & Perry, 1983).

En un estudio realizado por Lu y Zhang se presenta un nuevo enfoque llamado muestreo de importancia o simulaciones rápidas (Z. Lu & Zhang, 2003). El método se ha utilizado ampliamente en la teoría de la comunicación para estimar la probabilidad de eventos raros. La idea básica detrás de las técnicas de muestreo de importancia es que ciertos valores de las variables (o vectores) aleatorios de entrada tienen un impacto más importante en los parámetros que se estiman que otros, y si estos valores "importantes" se muestrean con más frecuencia que otros, es decir, muestreado a partir de una función de densidad sesgada, la varianza del estimador puede reducirse. Los resultados de las simulaciones fueron ponderados para corregir dicho muestreo sesgado. Se proporcionan dos ejemplos ilustrativos para mostrar el procedimiento general del enfoque de muestreo de importancia, así como su aplicabilidad al flujo sub-superficial y los problemas de transporte. En un ejemplo, estimamos la media y la varianza de la cabeza hidráulica para el flujo unidimensional, y en el otro estimamos la probabilidad de que el tiempo de viaje de una partícula t sea menor que un valor crítico dado T .

En el estudio mencionado anteriormente (Z. Lu & Zhang, 2003) se plantaron dos ejemplos. En ambos se compararon los resultados de las soluciones analíticas, las simulaciones convencionales de Monte Carlo (CMC) y el enfoque de muestreo de importancia. Se mostró que cuando se elige adecuadamente una función de densidad de importancia, las técnicas de muestreo de importancia pueden ser de muchos órdenes de magnitud más eficientes que las simulaciones de CMC y tienen un gran potencial para simular el flujo y el transporte sub-superficial. La densidad de importancia para el estimador medio se elige de tal forma que la varianza del estimador medio se reduzca mientras se preserva la media. Por lo tanto, no es posible afirmar que la función de densidad que minimiza la varianza del estimador de la media minimiza también la varianza del estimador de varianza. Dicho de otra manera, pueden ser necesarias distintas funciones de densidad de importancia para estimar tanto la cantidad media y su predicción de varianza asociada. Cabe destacar que las propiedades del medio se asumieron como constantes en el estudio. Se recomienda ampliar este enfoque a los campos aleatorios correlacionados para aplicar las técnicas de muestreo de importancia al mundo real.

Para la selección de funciones de densidad de importancia, primero Lu y Zhang asumieron una distribución gaussiana y seleccionaron dos maneras de abordar el problema; la escala de variación (VS) (Davis, 1986) y la traducción media (MT) (D. Lu & Yao, 1988), o su combinación. Los conceptos de la traducción media (MT) y la escala de variación (VS) se ilustran en la Ilustración 5, donde $f(x)$ corresponde a la función de densidad original. En el caso de que el problema a abordar se encuentre relacionado con una probabilidad pequeña tal que $P(x < x_0)$, la simulación CMC no será eficiente debido a la dificultad de tomar muestras de la función de densidad tal que $x < x_0$ cuando x_0 es muy pequeña.

En la Ilustración 5 (a), al utilizar MT es posible cambiar la media de la función de densidad a x_0 al tiempo que se aumenta la frecuencia para tomar muestras de $x < x_0$ de la nueva función de densidad $f_1(x)$. En la Ilustración 5 (b), al utilizar VS se aumenta la frecuencia de muestreo para $x < x_0$ aumentando la varianza. En la Ilustración 5 (c), se ilustra la combinación de MT y VS.

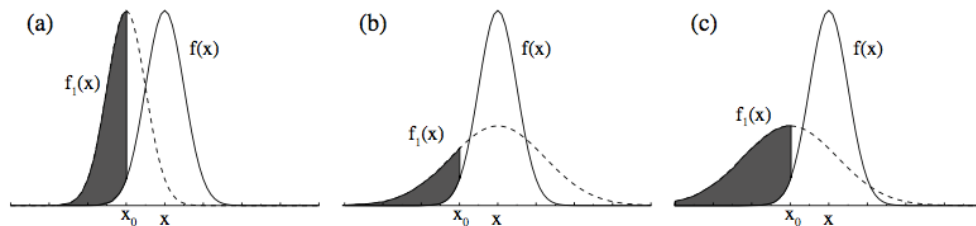


Fig. 1. Schematic diagrams showing: (a) MT, (b) VS, and (c) their combination in one dimension. Shaded area indicates the effective IS probability mass.

Ilustración 5 Diagramas esquemáticos mostrando: (a) MT, (b) VS, y (c) su combinación en una dimensión (Z. Lu & Zhang, 2003).

Considerando la incertidumbre debido a la heterogeneidad de los sistemas naturales se realizó un estudio para determinar su efecto en la determinación de la permeabilidad de los medios porosos (Li, LeBoeuf, Basu, & Mahadevan, 2005). En este, un método de fiabilidad de primer orden (FORM) fue combinado con el método de Lattice Boltzmann (LBM) para estimar la permeabilidad de los medios porosos generados aleatoriamente. Se planteó un procedimiento en aras de facilitar el abordaje de problemas que involucren estructuras de poro complejas empleando el método LBM para modelar el flujo de fluidos, mientras se provee la eficiencia computacional del método FORM. Al ser implementado en varios dominios de medios porosos generados aleatoriamente, el método propuesto provee entre 13 y 120 veces la eficiencia provista por los métodos de Monte Carlo. Por simplicidad, se supone una distribución normal con una media de 0,5 y coeficiente de varianza (COV) de 0,12 para la porosidad variable aleatoria debido a que con estos valores es poco probable el obtener un valor de probabilidad de una porosidad negativa.

La Ilustración 6 e Ilustración 7 muestran la influencia de las distribuciones de tamaño de partícula en las funciones de distribución acumulada (CDF) de permeabilidad. En primer lugar, se observó que los dominios con diámetros medios de partícula más grandes o COV de mayor diámetro de partícula, poseen mayores valores medios de permeabilidad y mayores probabilidades de alcanzar valores de permeabilidad más altos. Este fenómeno pudo ser explicado en términos del área superficial específica, o la relación del área de superficie de la partícula en contacto con el fluido por unidad de volumen. Se puede decir que el área superficial específica es mayor para los dominios que están bien distribuidos o poseen diámetros medios de partícula menores, esto se traduce en una mayor área de contacto con el fluido incrementando la resistencia por fricción al flujo del fluido, disminuyendo así su permeabilidad (Li et al., 2005).

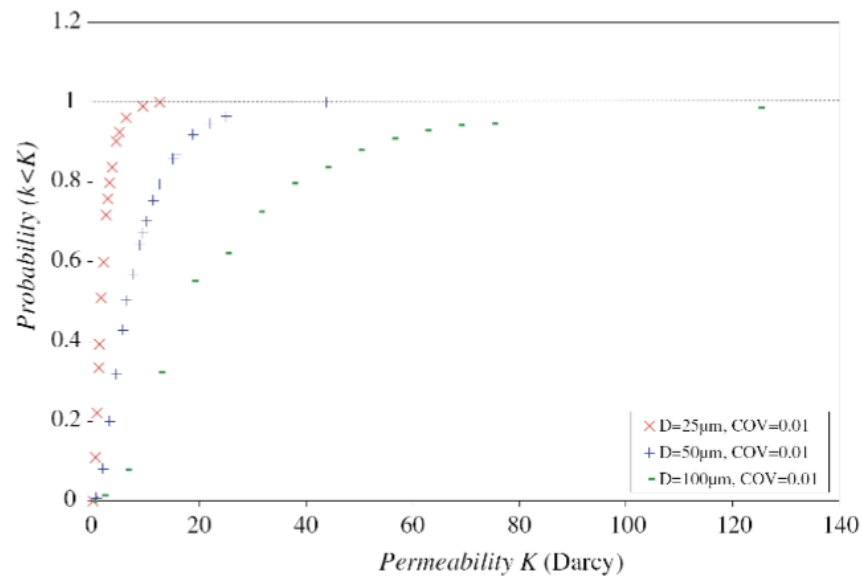


Ilustración 6 Influencia del diámetro medio de partículas en la permeabilidad de los medios porosos CDF para dominios con un diámetro de partícula medio geométrico $D = 50 \mu m$ y COV diferentes (Li et al., 2005)

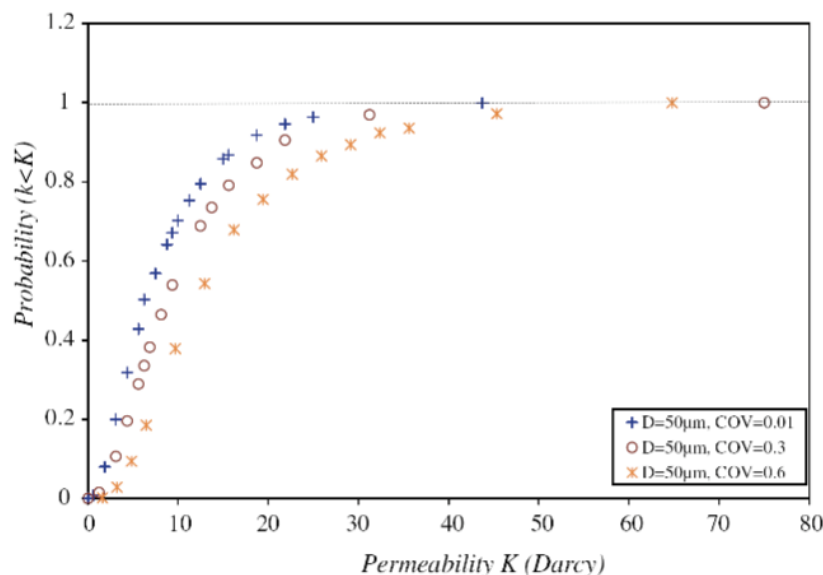


Ilustración 7 Influencia de la clasificación de partículas en la permeabilidad de los medios porosos CDF para dominios con diámetro geométrico medio de partícula $D = 50 \mu\text{m}$ y COV diferente (Li et al., 2005)

Vale la pena señalar que aun cuando esta nueva metodología proporcione una mayor precisión y eficiencia que las simulaciones de Monte Carlo, este debe ser mejorado. Esto se debe a que el método LBM implementado en este estudio está en la forma BGK (Bhatnagar, Gross, & Krook, 1954) con un operador de colisión lineal. La precisión de la permeabilidad basada en la forma BGK del método de Lattice Boltzmann (LBM) depende de la viscosidad del fluido y, por lo tanto, del tiempo de relajación seleccionando un valor optimizado del tiempo de relajación τ ($\tau = 0.8$) para eliminar esta dependencia. No obstante, se sugirió el uso de esquemas de LBM más sofisticados para simular el flujo del fluido en medios porosos. Además, se aceleró la velocidad de convergencia al usar valores de viscosidad más altos para TRT LBM (Two relaxation time lattice Boltzmann model o modelo de lattice Boltzmann con dos tiempos de relajación). Una segunda mejora potencial del método está asociada con el método de fiabilidad empleado. Si bien FORM se desempeñó bien en los dominios utilizados como ejemplo en este estudio, es posible que se requieran métodos más avanzados, como SORM (Modelo de fiabilidad de segundo orden) u otras formas modificadas de FORM, para situaciones que son más complicadas. Finalmente, los resultados de la simulación en este trabajo se basaron en medios porosos simplificados, bidimensionales y generados aleatoriamente. Se considera que los esfuerzos futuros de modelado se beneficiarán del uso de módulos de empaquetamiento de medios porosos más sofisticados para reflejar más de cerca situaciones de campo reales.

6 PLAN EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el plan experimental ejecutado en el presente trabajo. A continuación, se describen las características de los materiales utilizados, es decir, la arena y la arcilla. Además, se detalla la metodología del ensayo de permeabilidad de cabeza constante, los componentes de la celda de Rowe, el montaje de la muestra y la obtención del parámetro B de Skempton, útil en el cálculo de la permeabilidad utilizando la celda de Rowe.

6.1 Metodología en el Laboratorio

Los ensayos de permeabilidad se realizaron siguiendo los lineamientos establecidos por el INVIAS en la especificación I.N.V.E.-130-13 permeabilidad de suelos granulares cabeza constante (INVIAS, 2013). Se utilizó la especificación I.N.V. E – 123 – 13 determinación de tamaño de las partículas de los suelos (INVIAS, 2013) tanto para la arena como para la arcilla. Adicionalmente, se siguieron los lineamientos de la especificación I.N.V. E – 181 – 13 para la clasificación del suelo utilizando el sistema de clasificación unificado de suelos.

Los resultados obtenidos se unieron con otros resultados experimentales de trabajos de maestría que se desarrollan paralelamente con el mismo material.

Posterior a la ejecución del ensayo anteriormente descrito, se procedió a calibrar el equipo de la Celda de Rowe (*Hidrocom*). Para tal fin, se realizó una capacitación con un experto de la empresa proveedora del equipo.

Durante la investigación con la Celda de Rowe se detectaron algunos componentes en mal estado, en especial algunos detalles de tubería y la membrana interna de la celda de presión de la cámara. Por lo tanto, se realizó una labor de reparación de la membrana mencionada en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte.

Posteriormente, se adaptaron los acoples y mangueras faltantes para poner en funcionamiento el equipo, posibilitando el uso del aparato en conjunto con la creación de los protocolos necesarios para su uso.

Los materiales empleados en esta investigación corresponden a la arena de Santo Tomás y una arcilla Caolín. Estos materiales se describen a continuación.

6.2 Materiales

6.2.1 Caracterización de arena de Santo Tomás

Para la caracterización de la arena de Santo Tomás se realizaron varios ensayos de granulometría de acuerdo con la especificación I.N.V. E – 123 – 13- determinación de tamaño de las partículas de los suelos (INVIAS, 2013) y se obtuvo la curva granulométrica mostrada en la Ilustración 9, en la cual se comparan los resultados de distintos ensayos granulométricos realizados a la arena tamizando tanto manualmente como mecánicamente. Se puede observar que el patrón de distribución de tamaño de partículas se mantiene constante en los ensayos realizados.

Los equipos utilizados en este ensayo corresponden principalmente a tamices de tamaño adecuado, tanto convencionales como mecánicos y balanzas para poder realizar el cálculo de porcentajes en peso retenidos de cada tamaño de partícula.

El método utilizado para la clasificación de la arena es el sistema unificado de suelos (SUCS o USCS por sus siglas en inglés) según la especificación I.N.V.E 181-13-Sistema unificado de clasificación de suelos en ingeniería (INVIAS, 2013). En la Ilustración 11, se muestran los parámetros establecidos por el sistema geológico de los Estados Unidos (USGS) utilizados para realizar la clasificación. Tomando dichos valores como base junto con los resultados del ensayo granulométrico se pudo determinar que el material está compuesto principalmente por arenas con un porcentaje de finos de 1,21%. Considerando el promedio de los resultados obtenidos para cada una de las muestras ensayadas según se muestra en la tabla 4 a continuación, se calculan los diámetros de partículas característicos D_{10} , D_{30} y D_{60} usando una estimación lineal con los datos del ensayo granulométrico según se muestra en la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18 en el anexo 11.2. Se obtiene un coeficiente de uniformidad de 4,08 lo cual incumple con el mínimo requerido para considerar el material como bien gradado que es 6 y un coeficiente de curvatura de 0,98, fuera del rango permitido para considerar la arena como bien gradada el cual está entre 1 y 3. De esta manera, se estima teniendo en cuenta los resultados obtenidos del ensayo granulométrico que el material posee porcentaje menor al 5% de finos o material que pase el tamiz No. 200 lo cual puede verse explicado en que se utiliza una arena comercial y debido a que el coeficiente de uniformidad no cumple, se clasifica como arena mal gradada (SP).

Tabla 4 Coeficiente de uniformidad y curvatura promedio según muestra

Variable	Value
D_{60} (mm)	0,64
D_{30} (mm)	0,31
D_{10} (mm)	0,16
C_u	4,08
C_c	0,98

Tabla 5 Descripción de las muestras de arena

Soil sample	Description
1	Manual sieving-washed sand
2	Manual sieving-non-washed sand
3	Mechanical sieving-washed sand
4	Mechanical sieving-washed sand



Ilustración 8 Tamices y agitador mecánico

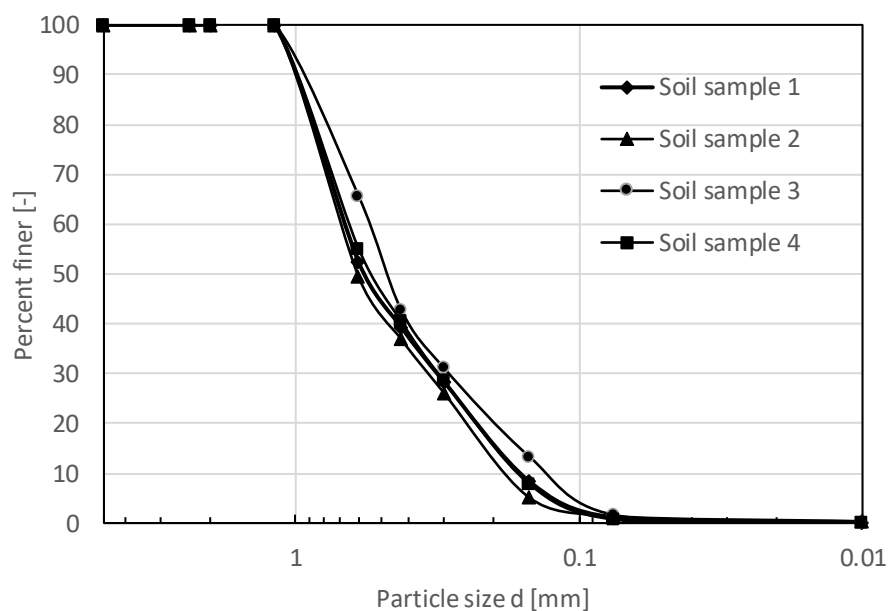


Ilustración 9 Granulometría según muestra de arena

Tabla 6 Porcentaje que pasa según diámetro para cada muestra

Particle size d (mm)	Percent finer [-]				
	Soil sample 1	Soil sample 2	Soil sample 3	Soil sample 4	Average
4,75	100	100	100	100	100,00
2,36	100	100	100	100	100,00
2	100	100	100	100	100,00
1,18	99,8	99,85	99,86	99,83	99,83
0,6	52,4	49,43	65,67	55,10	55,65
0,425	39,4	36,95	42,88	40,55	39,94
0,3	28,4	26,14	31,15	28,53	28,56
0,15	8,4	5,13	13,38	7,85	8,69
0,075	1,1	1,38	1,62	0,72	1,21
0,01	0,2	0,36	0,17	0,00	0,18

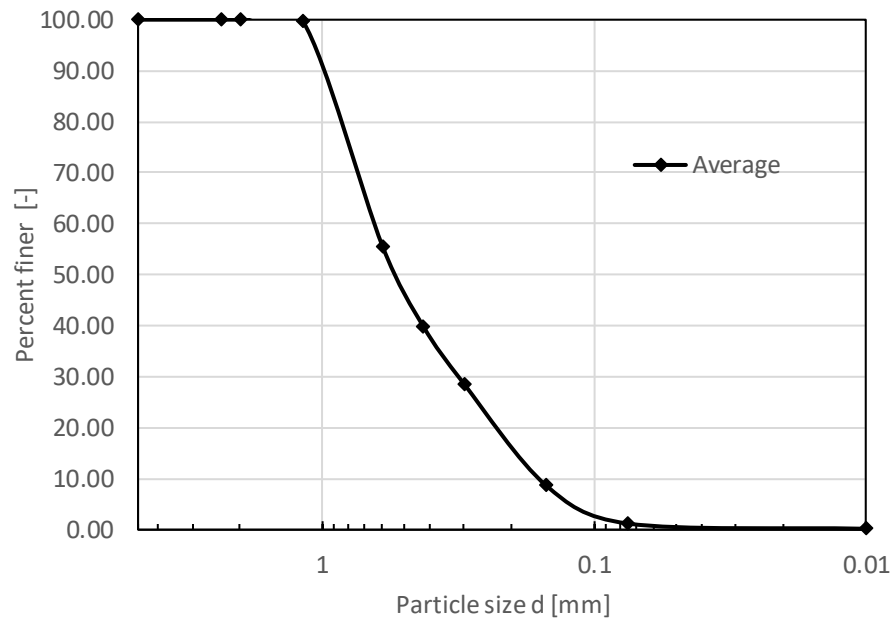


Ilustración 10 Granulometría promedio arena

Descripción general	Características	Símbolo del grupo	Denominación del grupo
Arena con menos de 5% de finos	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$	SW	Arena bien gradada
	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$	SP	Arena mal gradada
Arena con 5%-12% de finos limosos	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$	SW-SM	Arena bien gradada con finos limosos
	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$	SP-SM	Arena mal gradada con finos limosos
Arena con 5%-12% de finos arcillos o arcillo-limosos	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$	SW-SC	Arena bien gradada con finos arcillosos
	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$	SP-SC	Arena mal gradada con finos arcillosos
	Los finos clasifican como ML o MH	SM	Arena limosa
Arena con mas de 12% de finos	Los finos clasifican como CL o CH	SC	Arena arcillosa
	Los finos clasifican como CL-ML	SC-SM	Arena arcillo-limosa

Ilustración 11 Clasificación de suelos según el tamaño de las partículas según el sistema unificado de clasificación de suelos [INVIAS]

6.2.2 Caracterización del Caolín.

Para esta fue necesario determinar parámetros como la gravedad específica a 20°C utilizando los lineamientos establecidos por la especificación I.N.V. E – 128 – 13- determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (INVIAS, 2013). A partir del ensayo de gravedad específica se obtuvo un valor de 2,66 el cual se aproxima a la caolinita como se muestra en la Tabla 7.

En la Tabla 20 de la sección de anexos se encuentran los datos utilizados para el cálculo de la gravedad específica. Para este ensayo se determinó un porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 de 88,9%.

Tabla 7 Gravedad especifica o densidad de solidos de minerales importantes (Das, 2001)

Mineral	Specific Gravity [-]
Quartz	2,65
Kaolinite	2,6
Illite	2,8
Montmorillonite	2,65-2,80
Halloysite	2,0-2,55
Potassium feldspar	2,57
Sodium and calcium feldspar	2,62-2,76
Chlorite	2,60-2,90
Biotite	2,80-3,20
Muscovite	2,76-3,10
Hornblende	3,00-3,47
Limonite	3,60-4,00
Olivine	3,27-3,37

Adicionalmente, en la Tabla 19 en la sección de anexos se muestran los valores obtenidos mediante el ensayo del hidrómetro según la especificación I.N.V. E – 123 – 13- determinación de tamaño de las partículas de los suelos (INVIAS, 2013). Este ensayo se

realizó utilizando un hidrómetro y una solución de hexametáfosfato de sodio en agua destilada a una concentración de 0,05 N. A partir de los datos del ensayo se realizó una gráfica donde se encuentra el tamaño de partícula en escala logarítmica y el porcentaje de material que pasa, en la Ilustración 12 se muestra la distribución de tamaños de partícula del caolín.

Las características del caolín a ensayar se encuentran resumidas en la Tabla 8. Entre las que se incluye el contenido de humedad de la muestra, el porcentaje de finos y la gravedad específica.

Tabla 8 Propiedades caolín

Property	Value
Moisture content (%)	1,62
Percentage passing sieve # 200 (-)	88,91
Specific gravity (-)	2,66

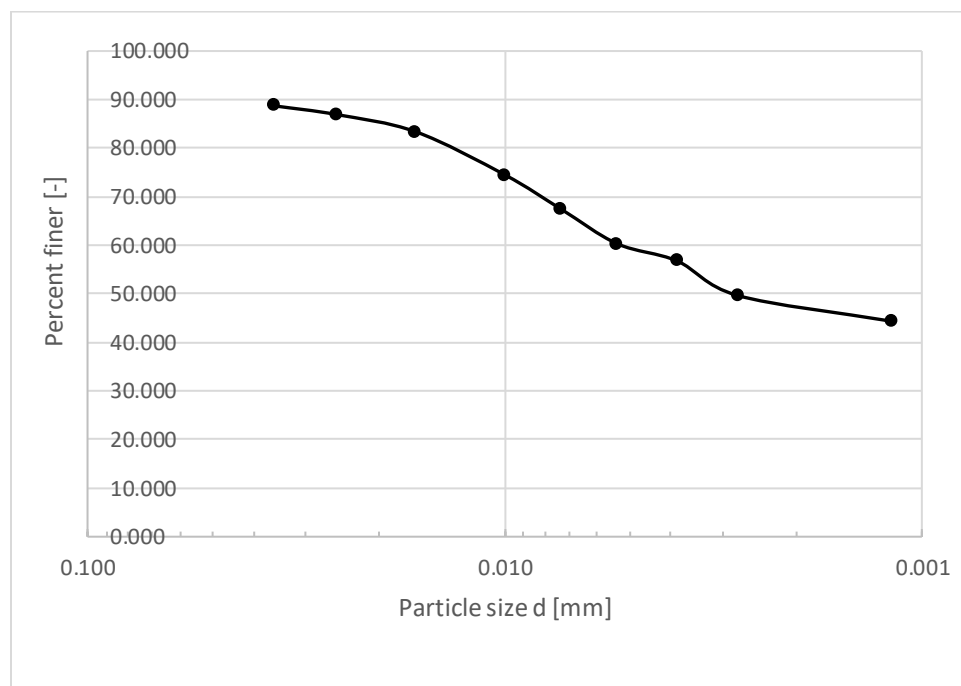


Ilustración 12 Distribución de tamaño de partícula caolín

Por su parte, para determinar la permeabilidad del caolín se realizó el ensayo de cabeza variable para suelos finos. Este ensayo no se realizó con una especificación de ensayos de INVIAS puesto que solo cuenta el ensayo para suelos granulares. Considerando la temperatura del laboratorio en el momento del ensayo, la longitud y el diámetro del espécimen se puede calcular tanto el área como el volumen del espécimen. También se debe tener en cuenta la gravedad específica y la relación de vacíos para que a través de la

Ecuación 5, se calcule la permeabilidad. Una vez se tenga este valor para varios ensayos, se saca un promedio a la temperatura especificada para luego mediante los factores de conversión en la Tabla 9 se pase a 20°C. A partir de estos datos se estimó un coeficiente de permeabilidad de 1,90E-06 cm/s a una temperatura promedio de 20°C.

$$k = \frac{2,303V_w L}{(h_1 - h_2)tA} \log \frac{h_1}{h_2} ; \left(\frac{cm}{s^2} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Tabla 9 Variación de $\eta_{T^{\circ}C}/\eta_{20^{\circ}C}$

Temperature (°C)	$\eta_{T^{\circ}C}/\eta_{20^{\circ}C}$	Temperature (°C)	$\eta_{T^{\circ}C}/\eta_{20^{\circ}C}$
15	1,135	23	0,931
16	1,106	24	0,910
17	1,077	25	0,889
18	1,051	26	0,869
19	1,025	27	0,850
20	1,000	28	0,832
21	0,976	29	0,814
22	0,953	30	0,797

6.3 Ensayo de permeabilidad de cabeza constante

El ensayo de permeabilidad de cabeza constante es utilizado generalmente para suelos granulares, se debe realizar teniendo en cuenta la especificación de INVIAE I.N.V. E – 130 – 13- permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante) (INVIAE, 2013). Para este ensayo, la entrada de agua se debe ajustar de manera tal que la diferencia de cabeza entre la entrada y la salida permanezca constante mientras se esté realizando. Después de que un caudal constante se pueda establecer, se recolecta el agua por un intervalo calculando el volumen de agua recolectado a través de la Ecuación 6.

$$Q = AVt = A(ki)t = A\left(\frac{kh}{L}\right)t \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde

Q: volumen de agua recolectado

A: área transversal de la muestra

t: duración de recolección de agua

L: longitud del espécimen

Despejando la permeabilidad de la Ecuación 6, se tiene que;

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

Ecuación 7



Ilustración 13 Montaje ensayo de permeabilidad de cabeza constante

A partir de los valores experimentales de la permeabilidad de 100% de arena y 100% de caolín se hizo posible la creación de una regresión para poder estimar el valor de la permeabilidad para cualquier combinación de arena-caolín. La ecuación utilizada se ilustra a continuación.

$$k_{x\%} = k_{0\%} + (1 - \exp(-c * x_{\%})) * (k_{100\%} - k_{0\%})$$

Ecuación 8

Donde:

$k_{x\%}$ = Permeabilidad de muestra con un porcentaje determinado(x) de caolín

$k_{0\%}$ = Permeabilidad muestra de arena sin caolín

$k_{100\%}$ = Permeabilidad muestra de caolín sin arena

$x_{\%}$ = Porcentaje de caolín de la muestra

c = coeficiente empírico

En este estudio se encontró que el coeficiente empírico que mejor se ajustaba a los datos obtenidos experimentalmente tiene un valor de 0,28.

6.4 Celda de Rowe

6.4.1 Descripción celda de Rowe (Hidrocom)

Es un equipo desarrollado en la Universidad de Manchester por el profesor P.W. Rowe, con el objetivo de efectuar pruebas de consolidación en suelos de baja permeabilidad, sin los inconvenientes que presentan los consolidómetros convencionales.

Para su funcionamiento, la celda Rowe se diferencia de los demás consolidómetros en que la muestra de suelo es cargada hidráulicamente, mediante presión aplicada en un diafragma flexible ubicado en su parte superior. Igualmente, en la celda es posible controlar las condiciones de drenaje de la muestra y aplicando contrapresión pueden efectuarse mediciones de presión de poro durante la realización de las pruebas.

Debido a las características del equipo, también es posible llevar a cabo pruebas de permeabilidad bajo condiciones determinadas de esfuerzo efectivo; ya que en alguna de las líneas de drenaje es viable instalar un dispositivo para medir el volumen de agua expulsada de la muestra de suelo (Hidalgo Mejia, 2007).

6.4.2 Descripción de componentes

En el laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción de la Universidad del Norte se cuenta con una celda de Rowe de 9.9 cm de diámetro para la muestra de suelo, la cual fue adecuada e instrumentada para la realización del presente trabajo de grado.

Las dimensiones de la celda disponible en el laboratorio de la Universidad del Norte se describen en la Tabla 10.

Tabla 10 Dimensiones celda de Rowe

Dimension	Value
Inner diameter-small ring (mm)	99
Outer diameter-small ring (mm)	107
Equivalent radius of the sample (mm)	49.5
height-small ring (mm)	32
Cross section area-sample (mm) ²	7697.70
Height-sample (mm)	32
Volume-sample (mm) ³	246326.57
Inner diameter-large ring (mm)	108
Outer diameter-large ring (mm)	114
height-large ring (mm)	23

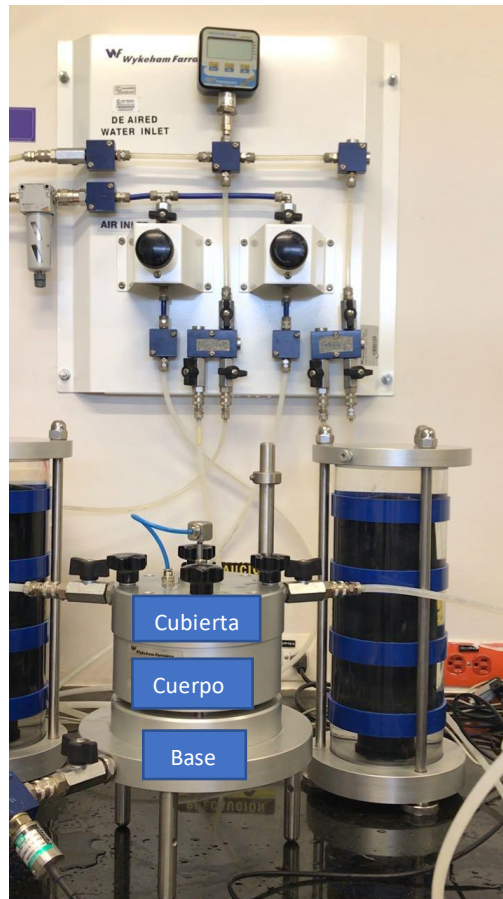


Ilustración 14 Celda de Rowe

La celda Rowe consta de tres partes: el cuerpo, la cubierta y la base, fabricados con una aleación de aluminio apropiadamente tratada para eliminar la porosidad.

En la Ilustración 14 se puede observar en detalle las tres partes que componen la celda, las cuales están unidas y aseguradas entre sí mediante tres tornillos largos, con sus respectivas rondanas y tuercas en los extremos superior e inferior. En la parte de abajo en la base de la celda se encuentra ubicada una válvula de drenaje, denominada válvula 15, la cual se puede observar detalladamente la Ilustración 15.

En la parte inferior de la cubierta se encuentra un diafragma de hule, cuyos bordes se acomodan entre ésta y el cuerpo de la celda, cumpliendo la función de transmitir uniformemente la presión sobre la muestra de suelo. En la parte central del diafragma se localiza una placa metálica, la cual a su vez va unida a una varilla hueca cuya parte inferior atraviesa la cubierta pasando por un sello de baja fricción, el cual permite su movimiento en sentido vertical sin dejar escapar el agua que debe llenar completamente el diafragma.

De igual manera, en la parte superior de dicha varilla se encuentra un cabezal en donde se apoya el transductor de desplazamiento, con el cual se mide el desplazamiento que va sufriendo el centro de la muestra de suelo durante la realización del ensayo.

La cubierta está conectada a la válvula 16, que se observa en la Ilustración 15, línea por donde se transmite la carga axial a la muestra de suelo, mediante la aplicación de la presión hidráulica que llega directamente al diafragma. También en la cubierta se encuentra un perno, el cual se abre para permitir que el aire que pueda encontrarse dentro del sistema de aplicación de la carga axial sea expulsado totalmente.

En la base de la celda, la parte inferior del cuerpo se acomoda sobre un aro-sello (o-ring) con el fin de garantizar un acople hermético entre ambos componentes. Igualmente, en el centro de la base se encuentra el punto principal para la medición de presión de poro, el cual consiste en una piedra porosa que se comunica con la válvula 15, que es la que antecede al transductor correspondiente.

La celda de Rowe presenta los siguientes insumos y accesorios:

- . Piedra porosa de 9,9 cm de diámetro, la cual se acomoda sobre la parte superior de la muestra de suelo de manera que conduzca el agua durante los ensayos de suelos hacia el agujero inferior de la varilla hueca, donde se inicia el drenaje. Según recomendaciones, la permeabilidad de este material poroso debe ser del orden de 1×10^{-3} cm/min (Head & Epps, 2014).
- . Elementos de instrumentación: transductores de presión axial, contrapresión y presión de poro, así como transductor de desplazamiento o LVDT.
- . Aro-sello para la base de la celda y diafragma de hule para la parte inferior de la cubierta.
- . Implementos para el labrado y ubicación de la muestra de suelo dentro del cuerpo de la celda, que incluyen dos anillos de acero de 9.9 cm y 10.8 cm de diámetro respectivamente y 3.2 cm de altura para el anillo interno.

En las siguientes ilustraciones es posible observar de manera detallada los componentes de cada una de las partes del sistema completo para realizar los ensayos con la Celda de Rowe – Hidrocom, que se encuentra en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción de la Universidad.

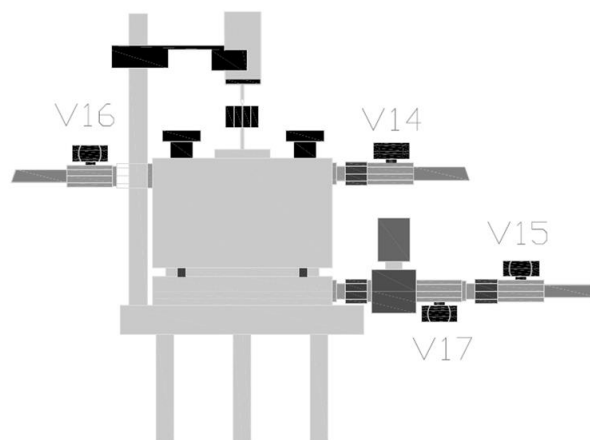


Ilustración 15 Diagrama esquemático de la configuración experimental

La Ilustración 15 detalla las válvulas presentes en la Celda de Rowe, los transductores y pernos.



Ilustración 16 Vista general del sistema de la celda de Rowe

La Ilustración 16 es una vista general de todo el sistema con conforma el Hidrocom en el laboratorio, se puede observar desde la bomba de vacío, el tanque de suministro de agua destilada, hasta el reservorio de agua y sus respectivas líneas de aire y agua hacia los bladders para finalmente llegar a la Celda de Rowe.

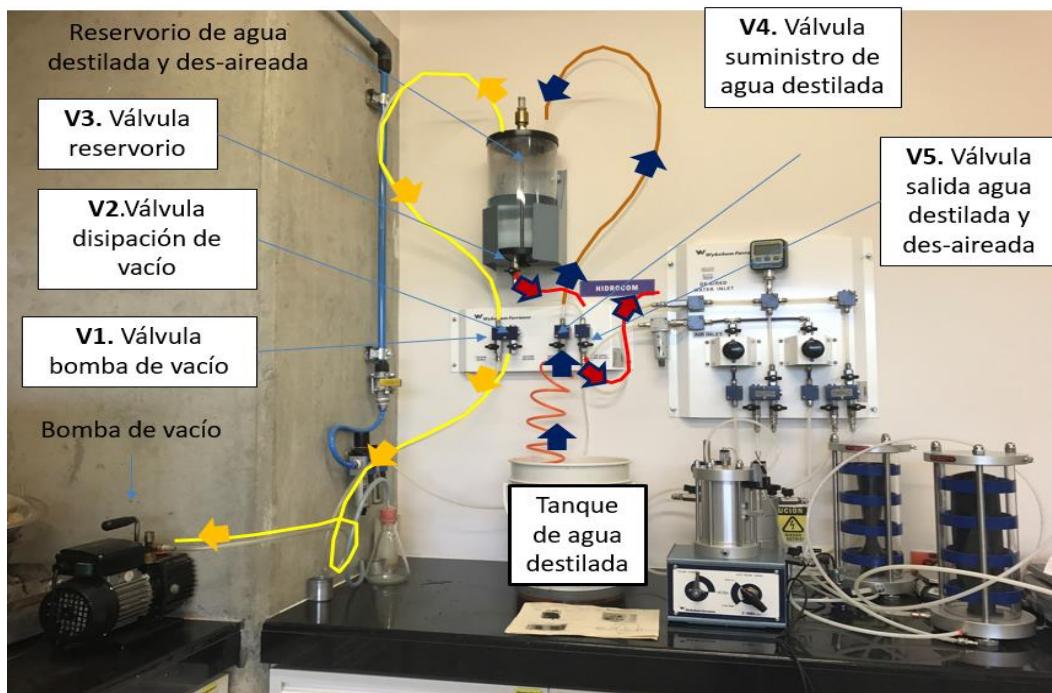


Ilustración 17 Válvulas suministro de vacío y agua

En la Ilustración 17 es posible observar detalladamente las válvulas y las líneas de suministro de vacío y agua al sistema.

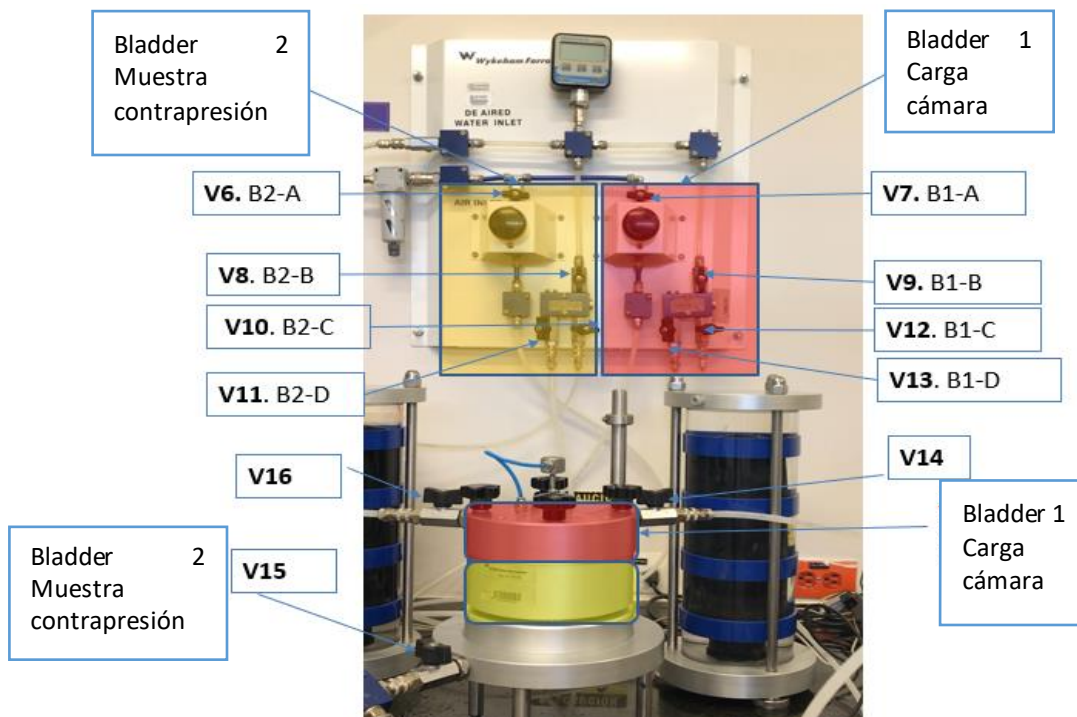


Ilustración 18 Bladder 1 y 2

La Ilustración 18 detalla las válvulas presentes en el tablero, que permiten realizar por medio de interfases (bladders) la conversión de presión de aire en presión de agua que será aplicada a la muestra a ensayar en la Celda de Rowe.



Ilustración 19 Vista detallada tablero perillas suministro de aire

La Ilustración 19 muestra un acercamiento de las perillas que posibilitan el incremento de presión hacia los bladders.



Ilustración 20 Interfaces agua aire y manómetro digital

En la Ilustración 20 se observa el manómetro digital que permite conocer la presión de los bladders o interfaces agua aire.

6.4.3 Montaje de muestras

En el momento no hay una especificación a nivel nacional para la preparación de las muestras en este tipo de ensayos. El procedimiento utilizado para el montaje de la muestra de suelo a ensayar en la celda de Rowe seguido en este trabajo obedece a

un procedimiento similar a ensayos triaxiales. Este se describe de manera detallada a continuación.

- Ubique la piedra porosa de mayor diámetro en la base de la celda con la cara lisa hacia arriba como lo muestra la Ilustración 21.
- Coloque el papel filtro de mayor diámetro sobre la piedra porosa, Ilustración 22.

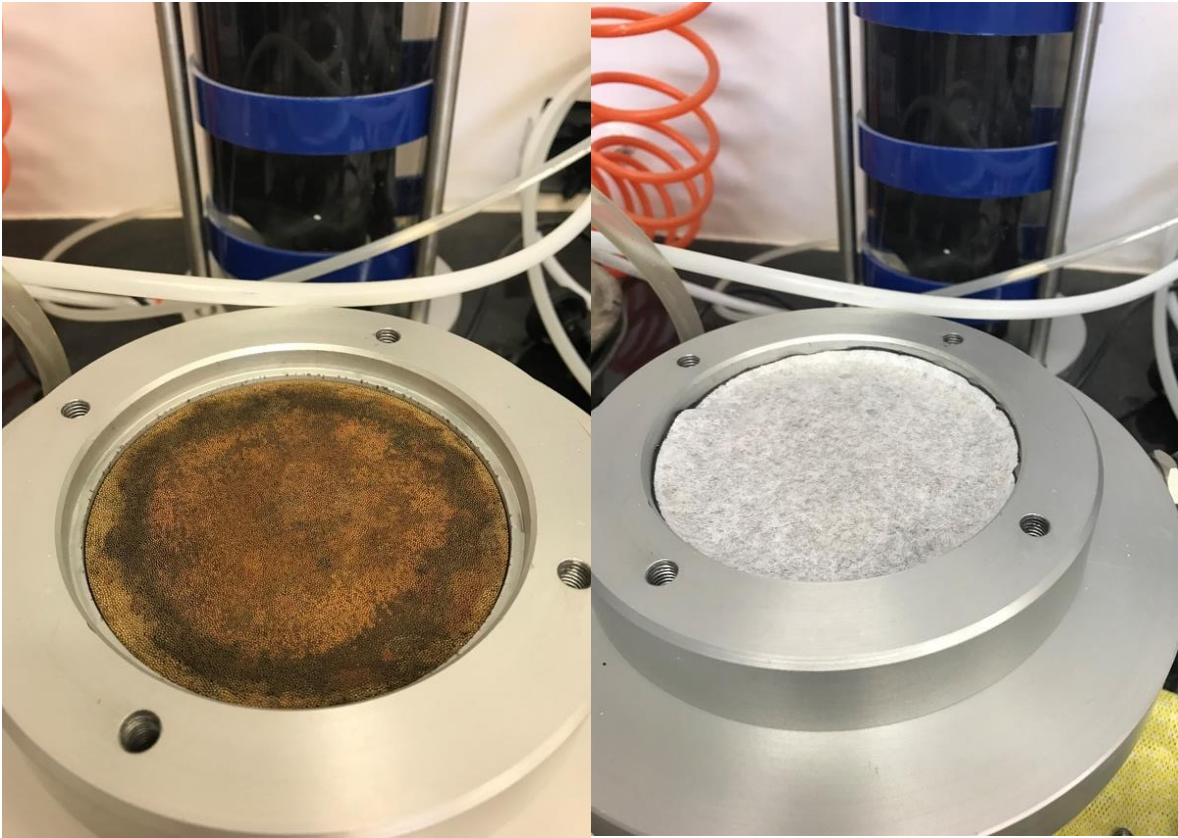


Ilustración 21 Colocación piedra porosa sobre base de la celda

Ilustración 22 Colocación papel filtro sobre piedra porosa

- Ubique el anillo pequeño sobre la piedra porosa y el papel filtro, Ilustración 23.
- Introducir un O-ring hasta el fondo rodeando el anillo de menor diámetro.



Ilustración 23 Colocación del anillo sobre el O-ring



Ilustración 24 Compactación de la muestra de suelo

- Monte la muestra de suelo en 3 capas compactadas a 25 golpes cada una, Ilustración 24. Este procedimiento es similar al sugerido por la especificación I.N.V. E – 217 – 13-densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto, donde se deben colocar 3 capas de igual volumen. Cada una se empareja con la mano y se apisona con 25 golpes de apisonador distribuidos de manera uniforme sobre la superficie.
- Coloque el papel filtro de menor diámetro sobre la muestra, Ilustración 25.

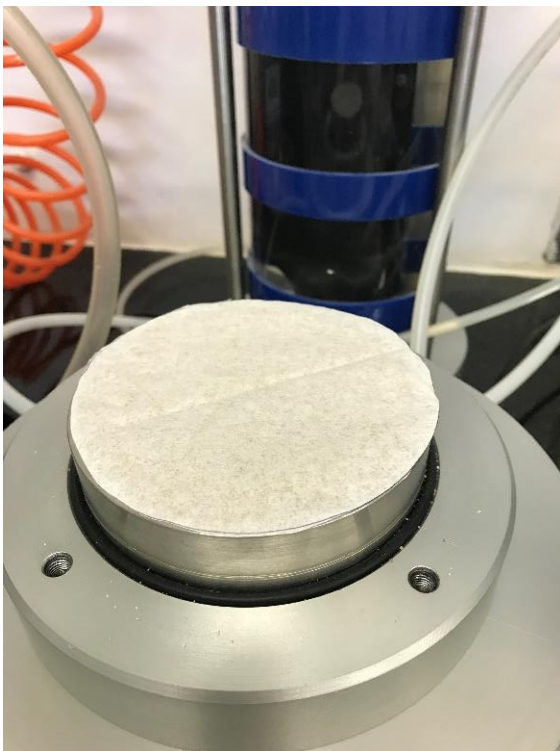


Ilustración 25 Colocación de papel filtro sobre la muestra



Ilustración 26 Colocación de piedra porosa superior

- Ubique la piedra porosa de menor diámetro con la parte lisa hacia la muestra, Ilustración 26.
- Introduzca el anillo de mayor diámetro a presión hasta que haga contacto con el o-ring en el fondo, Ilustración 26.
- Instale el segundo O-ring en la parte superior de la muestra, Ilustración 27.



Ilustración 27 Instalación de segundo O-ring

- Tape la muestra e instale los tornillos grandes en cruz, Ilustración 28.

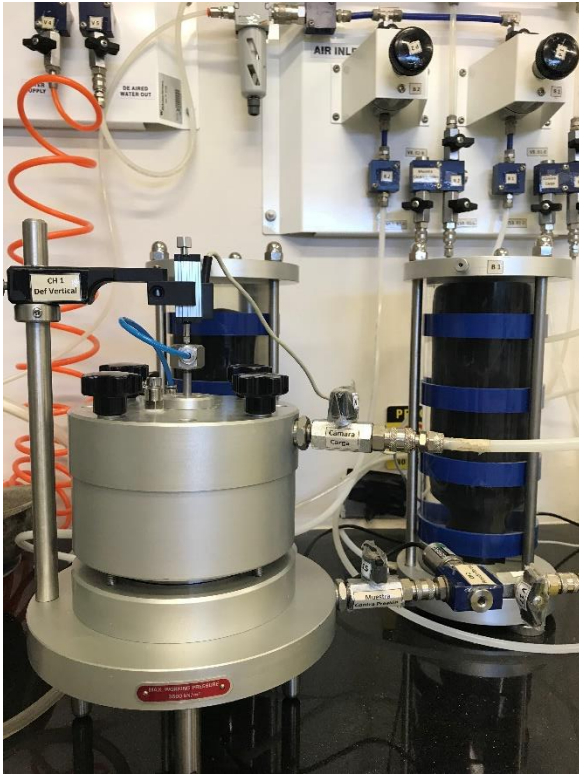


Ilustración 28 Instalación de tornillos grandes en muestra tapada

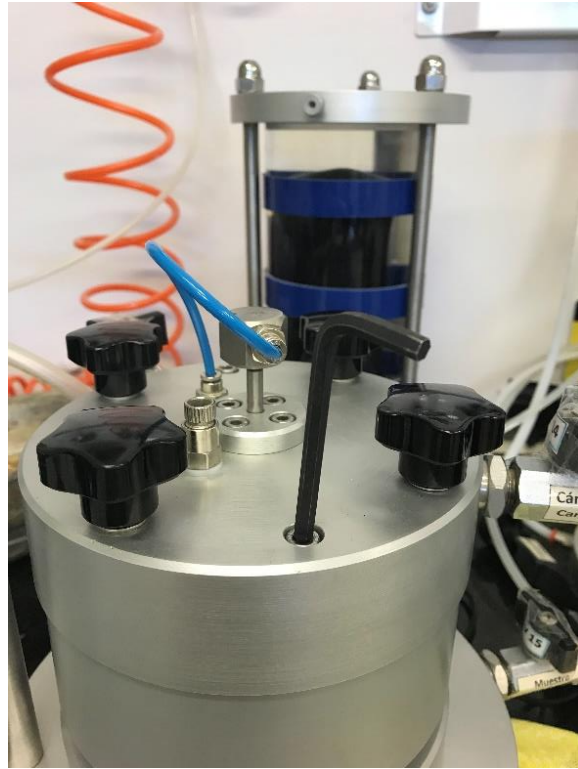


Ilustración 29 Instalación de tornillos pequeños

- Instale los tornillos pequeños con la ayuda de la llave tipo allen, Ilustración 29.
- Instale los transductores en la Celda, Ilustración 30.

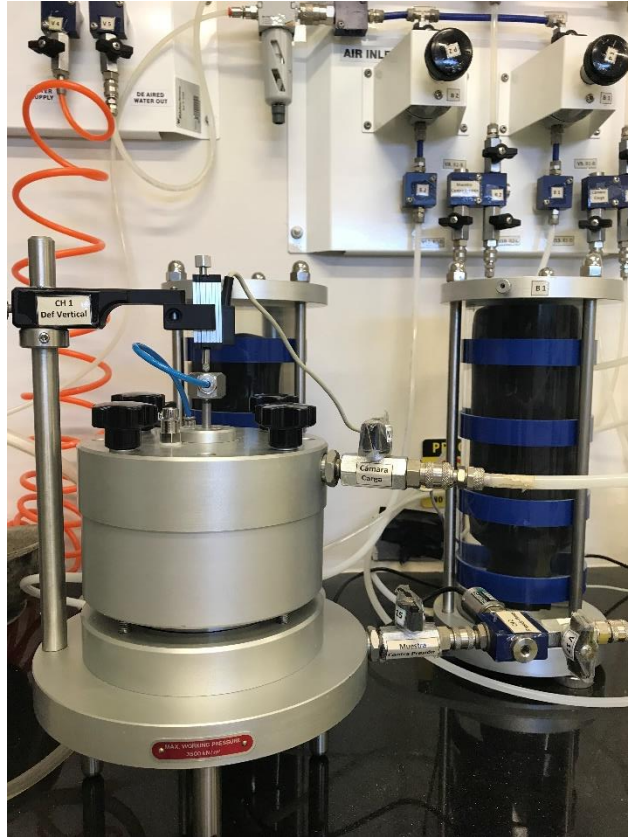


Ilustración 30 Instalación de transductores

6.4.4 Ensayo de permeabilidad usando la celda de Rowe (Hidrocom)

Para realizar el ensayo de permeabilidad se tomó como guía el manual de instrucciones del aparato (Farrance, n.d.). Primeramente, se debe saturar la muestra; para tal fin se realiza un chequeo con el parámetro B de Skempton. Este parámetro sirve para estimar el grado de saturación de un suelo. Para realizar su medición se aplicó un incremento a la presión axial en la muestra, manteniendo el mismo valor de contrapresión, y midiendo la respuesta del suelo a dicho incremento por medio del registro de la presión de poro en la base de la celda. El parámetro se define según la Ecuación 9;

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_{axial}}$$

Ecuación 9

En la Tabla 11 se muestran las lecturas utilizadas para realizar la medición del parámetro de Skempton. De igual manera, en la Ilustración 31 se observa la variación del parámetro del parámetro B de Skempton teniendo en cuentas distintas presiones de cámara.

Tabla 11 Parámetro de Skempton

Reading B1	Skempton's B parameter (-)	Skempton's B parameter (-)
0	0.0%	0.00
75	0.6%	0.57
110	0.7%	0.68
145	0.8%	0.80
180	0.9%	0.86
215	0.9%	0.91
250	0.9%	0.91

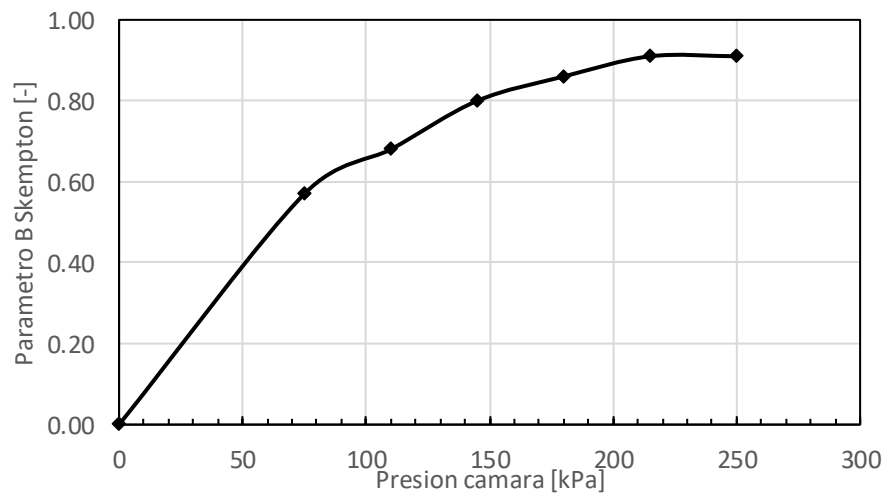


Ilustración 31 Variación del parámetro de Skempton según la presión de cámara

Seguidamente para el cálculo de la permeabilidad k con el Hidrocom se utiliza un procedimiento similar al empleado para el experimento de cabeza constante con el permeámetro tradicional y una vez obtenidos todos los parámetros necesarios se calcula por medio de la Ecuación 10, descrita más adelante.



Ilustración 32 Ensayo celda de Rowe(Hidrocom)

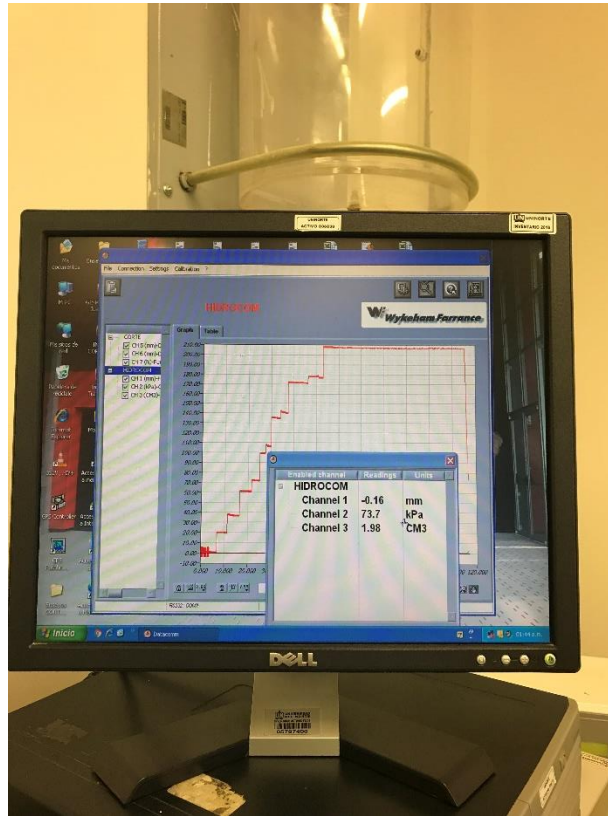


Ilustración 33 Software celda de Rowe (Hidrocom)

$$k = \frac{Q}{60Ai\Delta t}; \quad (m/s)$$

Ecuación 10

Donde;

K = Coeficiente de permeabilidad

Q = vol en ml en el t

Δt = Tiempo (min)

i = gradiente hidráulico = $(102 * \Delta p) / H$

Δp = incremento de presión (Kpa) = $p_1 - p_2$

H = Altura de la muestra (mm) = 32mm

A = Área sección transversal de la muestra (mm^2) = πr^2

7 RESULTADOS

7.1 Ensayo de permeabilidad de cabeza constante

El ensayo de permeabilidad de cabeza constante descrito en el título 6.3 arrojó los resultados de la Tabla 12 permitiendo encontrar los valores de la permeabilidad a 20°C teniendo en cuenta la relación de caolín-arena en cada muestra ensayada. Estos resultados se grafican en la Ilustración 34, en la que se observa una relación entre estas variables mostrando una relación inversa entre la permeabilidad y el contenido de caolín, es decir, que a medida que se aumenta el contenido de caolín en la muestra se disminuye la permeabilidad. Así pues, la permeabilidad más baja es la de la muestra con 100% de caolín. Los datos empleados para la obtención de estos resultados se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 12 Permeabilidad según porcentaje de caolín de Ensayo con permeámetro de cabeza constante

Kaolin content (%)	Permeability $\left(\frac{cm}{s}\right)$	Permeability 20°C $\left(\frac{cm}{s}\right)$
0	1,08,E-02	1,04,E-02
4	2,57,E-03	2,48,E-03
8	9,34,E-04	9,01,E-04
12	3,18,E-04	3,07,E-04
16	1,64,E-04	1,59,E-04

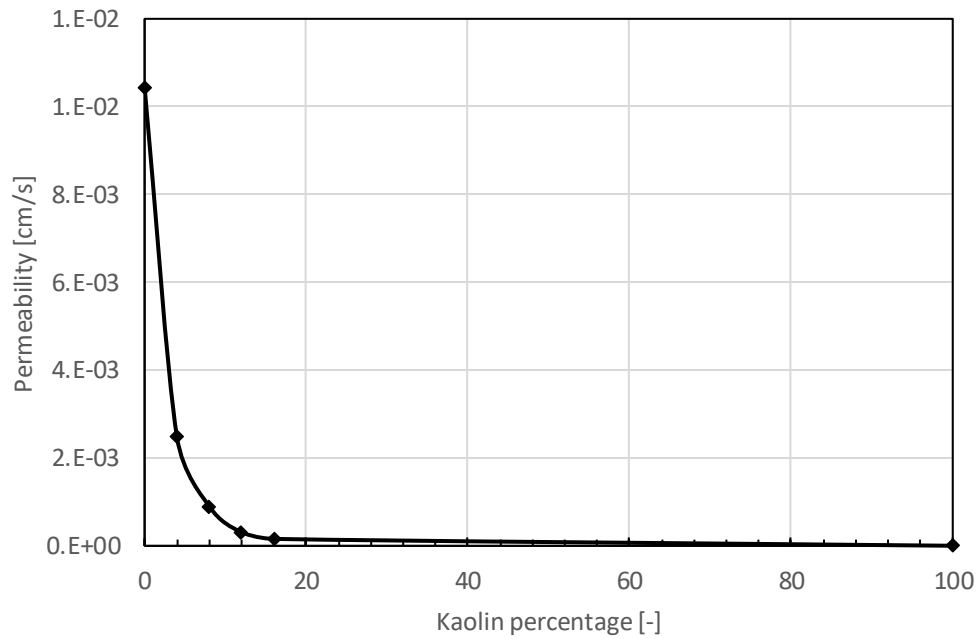


Ilustración 34 Permeabilidad vs porcentaje de finos con ensayo de permeámetro de cabeza constante

Tomando como base la Ecuación 8, en la Ilustración 35 se grafican los valores arrojados por la regresión junto con los valores obtenidos experimentalmente por medio del ensayo de permeámetro.

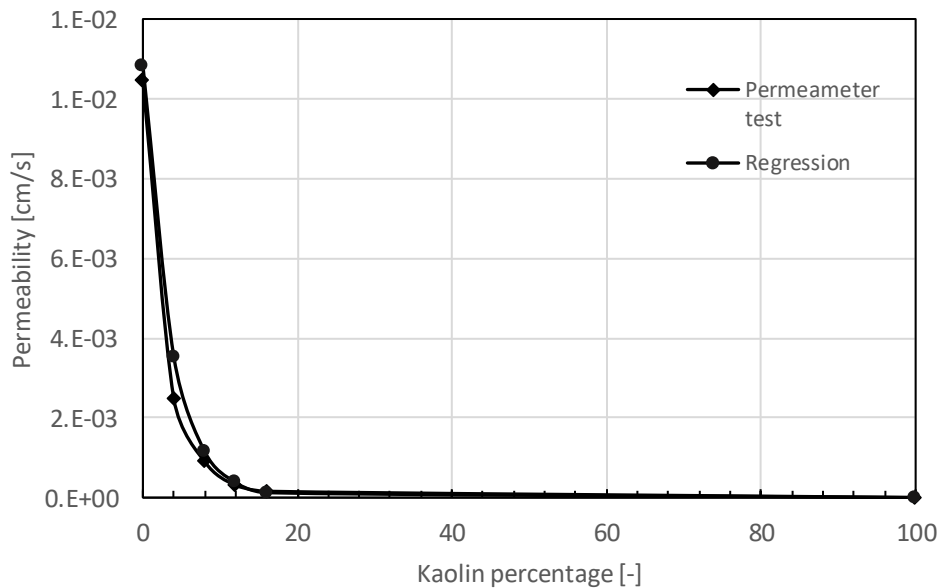


Ilustración 35 Comparación entre permeabilidad calculada por medio de ensayos y regresión empírica

7.2 Ensayo para determinar la permeabilidad de Caolín en la celda de Rowe – Hidrocom

Al realizar el ensayo de permeabilidad por medio de la Celda de Rowe – Hidrocom, se obtuvieron unos resultados hasta con dos órdenes de magnitud diferentes a los hallados con el permeámetro tradicional. Lo anterior indica que la permeabilidad disminuye a medida que se aumentó el porcentaje de finos en la muestra hasta llegar a un valor del orden de entre $10, \text{E}-06$ y $10, \text{E}-07$ para arcillas tipo caolín, el cual es un valor típico encontrado en la Tabla 1 para este tipo de material. Los datos empleados para el cálculo de la permeabilidad para cada contenido de arcilla se presentan en la Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24 en los anexos, mientras que el procedimiento se encuentra en el título 6.4.4.

Tabla 13 Permeabilidad según contenido de caolín con Celda de Rowe

Kaolin content (%)	Permeability (cm/s)
4	$1,17, \text{E}-04$
20	$4,70, \text{E}-07$
100	$7,94, \text{E}-06$

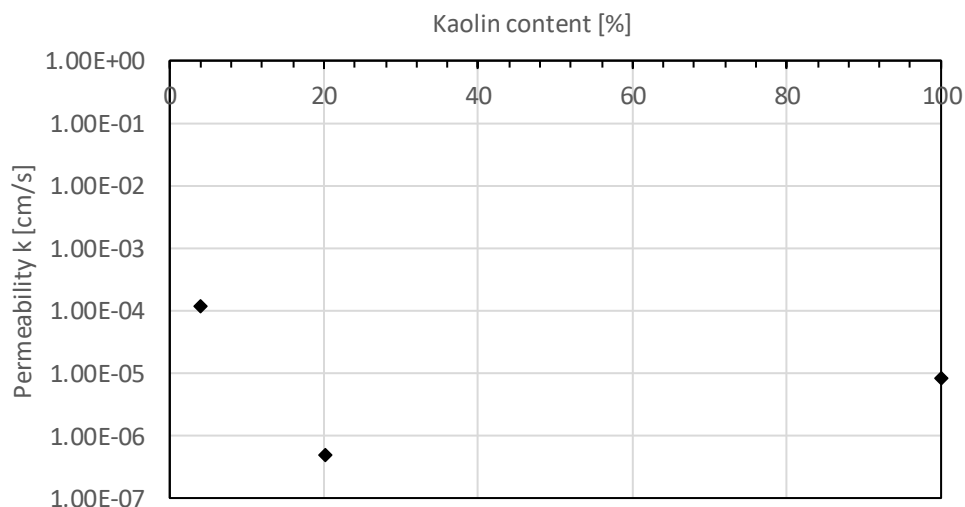


Ilustración 36 Variación de la permeabilidad respecto al contenido de caolín con Celda de Rowe

La ventaja indiscutible del uso de la Celda de Rowe es la certeza de tener una muestra saturada en muy poco tiempo (aproximadamente 30 minutos) por medio de incrementos de contra- presión en ésta, que permiten la obtención de un parámetro B satisfactorio para cada tipo de suelo. Adicionalmente, se cuentan con lecturas digitales por medio de los transductores conectados a ésta.



Ilustración 37 Ensayo permeabilidad celda de Rowe

En la Ilustración 38, se observa el comportamiento de la permeabilidad respecto a la variación del porcentaje de caolín en la muestra obtenidos mediante ensayos de laboratorio utilizando permeámetros y la celda de Rowe.

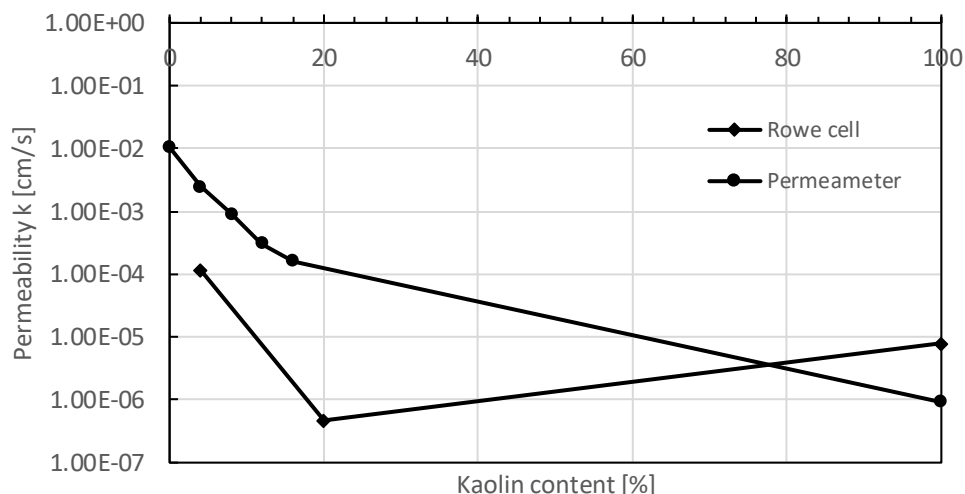


Ilustración 38 Permeabilidad obtenida mediante ensayo de permeámetro y celda de Rowe

7.3 Lavado de finos

Se ejecutaron varios ensayos utilizando el permeámetro tradicional por medio de los cuales se desea obtener un indicio del comportamiento de las arenas cuando poseen diferentes contenidos de material fino en este caso arcillas tipo caolín con contenidos de 50%, 30% y 20% enumerados como las muestras 1, 2 y 3, respectivamente. Los porcentajes de arcilla utilizado en cada ensayo junto con el gradiente hidráulico calculado son descritos a continuación en el título 7.3.1.

Por otra parte, los datos utilizados para el cálculo de los resultados de cada muestra se encuentran en la Tabla 25, Tabla 26, Tabla 27, Tabla 28, Tabla 29 y Tabla 30.

A continuación, se describe el procedimiento experimental para calcular la concentración de finos en el agua:

Inicialmente se monta una muestra de suelo con diferentes porcentajes de finos como lo evidencia la tabla 14. Esta muestra se monta sobre una cama de grava que permita el drenaje de las partículas finas.

Se deja saturar la muestra de suelo por periodo de aproximadamente una hora, tiempo después del cual se abre la válvula de drenaje en la parte inferior del permeámetro y se recolecta un volumen de agua en un tiempo determinado, después del cual se mide el volumen de agua y se seca al horno por 24 horas para finalmente pesar la masa de arcilla que se pudo lavar en el ensayo.

Tabla 14 Porcentajes de arcilla-arena y gradiente hidráulico para cada muestra

Sample	Kaolin content (%)	Sand content (%)	i (-)
1	50	50	22,98
2	30	70	27
3	20	80	27

7.3.1 Muestra 1

El primer ensayo se realizó con una mezcla de 50 % de arena y 50% de caolín. En la Ilustración 39 se observa como el lavado de finos en este ensayo se vio afectado por la tubificación que sufrió la muestra en el momento de la abertura de la válvula de drenaje del agua.



Ilustración 39 Ensayo lavado de finos muestra 1

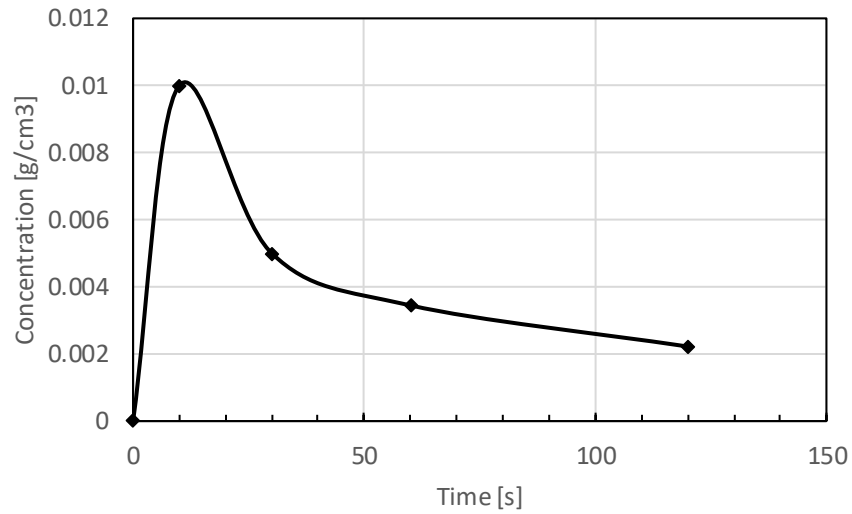


Ilustración 40 Concentracion (g/cm^3) vs Tiempo (min)-muestra 1

7.3.2 Muestra 2

El segundo ensayo se realizó con una mezcla de 70 % de arena y 30% de caolín. En la Ilustración 41 se muestra la variación de la concentración a través del tiempo en el cual se realizó el ensayo.

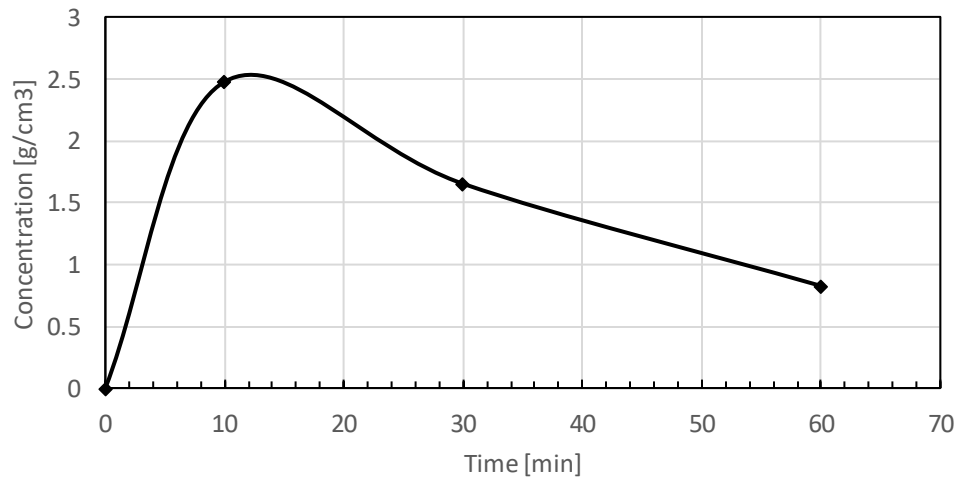


Ilustración 41 Concentracion (g/cm^3) vs Tiempo (s)-muestra 2

7.3.3 Muestra 3

El primer ensayo se realizó con una mezcla de 80 % de arena y 20% de caolín. En la Ilustración 42 se muestra la variación de la concentración a través del tiempo en el cual se realizó el ensayo.

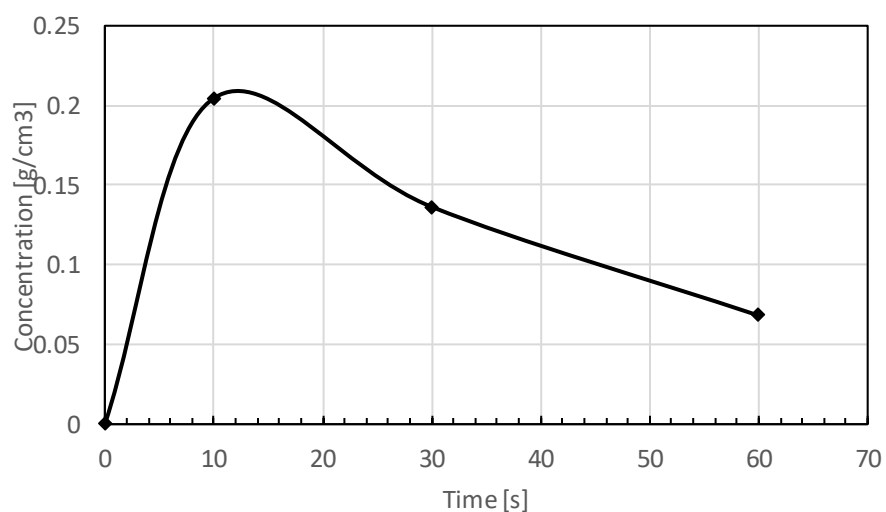


Ilustración 42 Concentracion (g/cm^3) vs Tiempo (s)-muestra 3

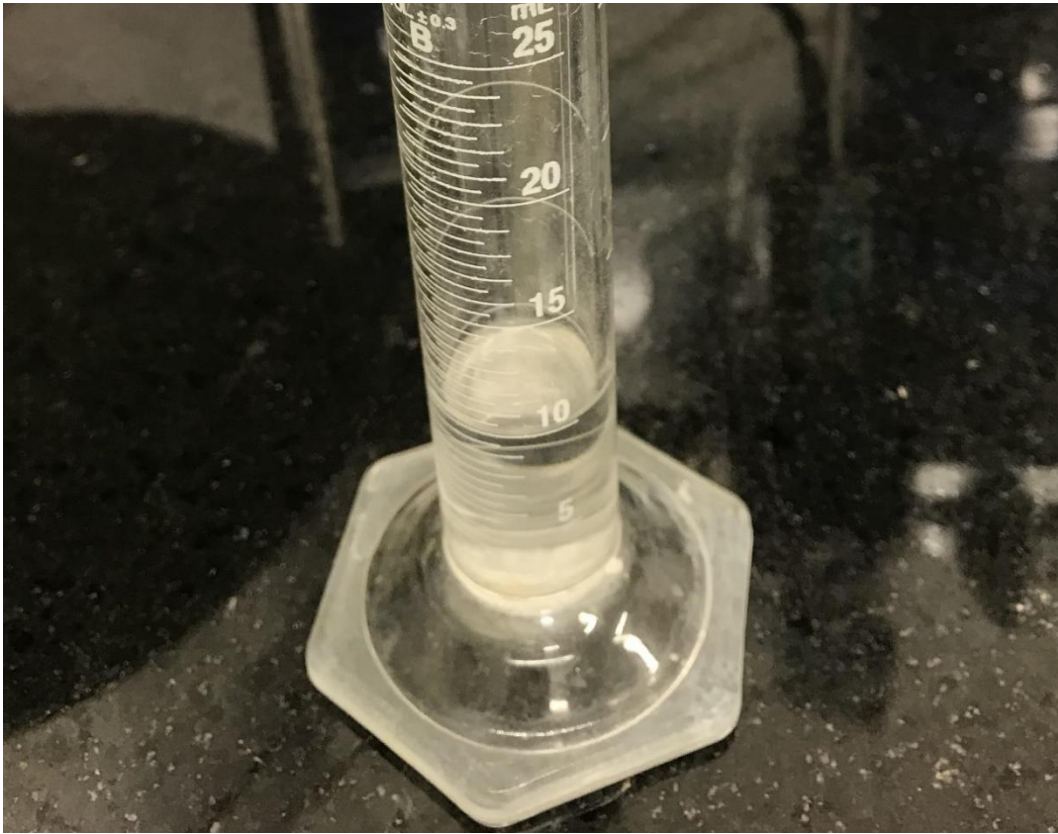


Ilustración 43 Medición del lavado de finos

De la Ilustración 40, Ilustración 41 e Ilustración 42, fue posible concluir que las concentraciones de finos para estas mezclas de materiales areno – arcillosos son muy bajas tanto en el permeámetro tradicional como en la Celda de Rowe, lo que dificultó la medición del volumen de finos después de los ensayos.

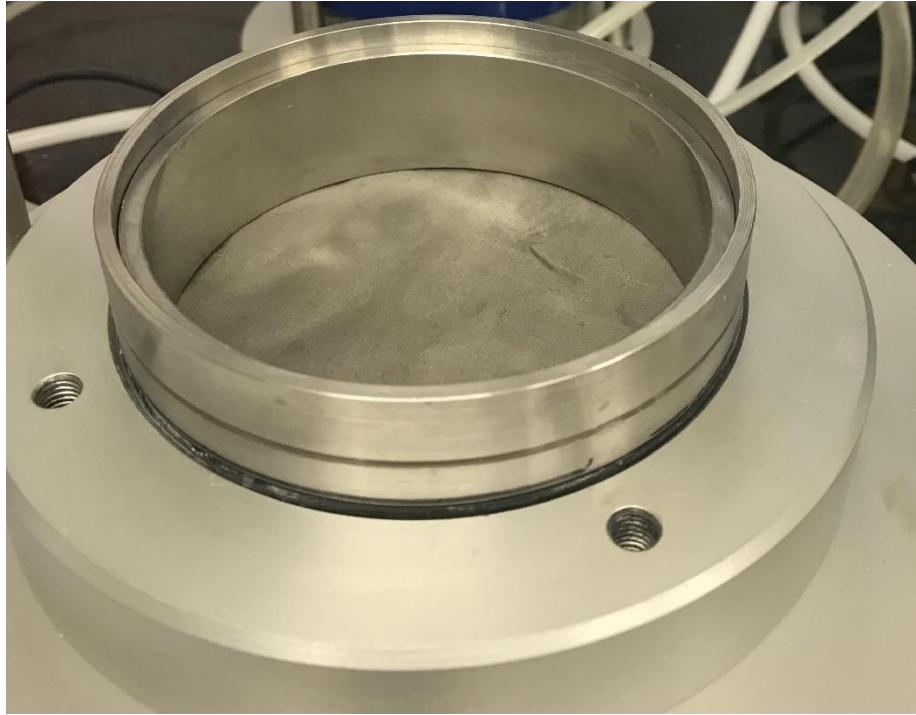


Ilustración 44 Colocación de tamiz No. 200 en la celda de Rowe

Inicialmente, con el permeámetro tradicional se pudieron medir unos pequeños valores para las concentraciones de finos. Sin embargo, a medida que se fue mejorando el montaje de la muestra y al utilizar una malla de Tamiz 200 en la Celda de Rowe, como lo muestra la Ilustración 44, fue posible concluir que los valores mayores de finos pudieron estar afectados por algunas partículas de tamaños superiores como arenas.

8 SIMULACIONES NUMÉRICAS CON MEZCLAS ARENO-ARCILLOSAS

En este capítulo se analiza la influencia de la distribución espacial de los finos con respecto a la permeabilidad. Para tal fin, se construye un problema de valor de contorno con elementos finitos para flujo bidimensional estacionario. El material corresponde a un suelo constituido por una mezcla areno-arcillosa y por lo tanto, la permeabilidad dependerá del porcentaje de finos. La relación de la permeabilidad con el porcentaje de finos fue hallada mediante los resultados de permeámetro de cabeza constante, véase el título 6.3, y se expresa en la Ecuación 8.

$$k_{x\%} = k_{0\%} + (1 - \exp(-c * x_{\%})) * (k_{100\%} - k_{0\%}) \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde c es una constante calibrada a los resultados de permeabilidad con el método del permeámetro. El método de los elementos finitos bajo condiciones 2D plane strain fue usado para resolver el problema. Para tal fin, se usó el software comercial ABAQUS Standard V6.16 (Dassault Systèmes, 2016). En los modelos de elementos finitos se crearon unas distribuciones espaciales de porcentajes de finos aleatorias. Específicamente, los valores de porcentaje de finos son guardados como variable de estado en cada punto de Gauss de cada elemento. El porcentaje de finos de este campo siguió una distribución normal en donde su media $\bar{\mu}$ y su desviación estándar $\bar{\sigma}$ se controlaron como variables de entrada. Se consideraron los valores de $\bar{\mu} = \{2.0\%, 5\% \text{ y } 10\%\}$ para la media, y consideraron desviación estándar igual a un factor multiplicado por la media $\sigma = F \bar{\mu}$, en donde F toma distintos valores entre 0 a 1.

Se construyeron dos problemas de valor de contorno con elementos finitos: el primer modelo simula un ensayo de permeabilidad similar al de cabeza constante, con una muestra de suelo de 1,00 m x 1,00 m. El segundo modelo simula un problema de flujo bidimensional similar al de una tablestaca. A continuación, se describe cada problema y se analizan sus resultados.

Para todos los casos se consideró el suelo en condiciones completamente saturadas. Bajo estos supuestos, el problema de elementos finitos se fundamenta en la ecuación de conservación de masa para suelos saturados (Fuentes, 2014) .

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial w_i^w}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde \dot{u}_i es la velocidad de desplazamientos, w_i^w es la velocidad de Darcy y \dot{p}_w es la tasa cambio de presión de poros. La ecuación que describe la velocidad de Darcy asumiendo permeabilidad isotrópica es:

$$w_i^w = -k_w \delta_{ij} \left(\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial p_w}{\partial x_j} - \frac{g_j}{g} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde k_w es el coeficiente de permeabilidad, g es la magnitud de la gravedad y g_j es el vector unitario apuntando en la dirección de la gravedad.

8.1 Desarrollo de subrutina para generar campo aleatorio de porcentaje de finos

Para lograr la dependencia de la permeabilidad con el porcentaje de finos, se tomó ventaja del hecho que el software ABAQUS permite condicionar la permeabilidad en función de la relación de vacíos, con una subrutina externa llamada VOIDRI escrita con el lenguaje de programación FORTRAN. Por lo tanto, para efectos prácticos, se aprovechó esta dependencia y se reemplazó la relación de vacíos con el porcentaje de finos. La programación de la subrutina VOIDRI que permite crear una distribución normal inicial se presenta en el anexo 11.7. En ella, los parámetros de entrada son la media μ y la desviación estándar $\bar{\sigma}$.

8.2 Descripción del problema simulando el ensayo de permeabilidad

Para la simulación del ensayo de permeabilidad se consideró una geometría cuadrada de 1 m de ancho por 1 m de alto. Se usó un enmallado fino de elementos 2D que integran la presión de poros como grado de libertad ("Pore Fluid/Stress element"), ver Ilustración 45. Se restringieron todos los desplazamientos en los nodos y se le asignaron 2 condiciones de borde de presión de agua: en la parte superior del modelo se consideró $p_w=0.0$ kPa, en la parte inferior se consideró $p_w=50.0$ kPa. Un esquema del problema a simular se aprecia en la Ilustración 46.

Al no tratarse de un problema de esfuerzo-deformación, el modelo constitutivo del material no influye en los cálculos. Sin embargo, para propósitos de modelación se asumió un modelo de material lineal elástico de parámetros: Modulo de Young $E= 5000$ kPa y coeficiente de poisson = 0.3.

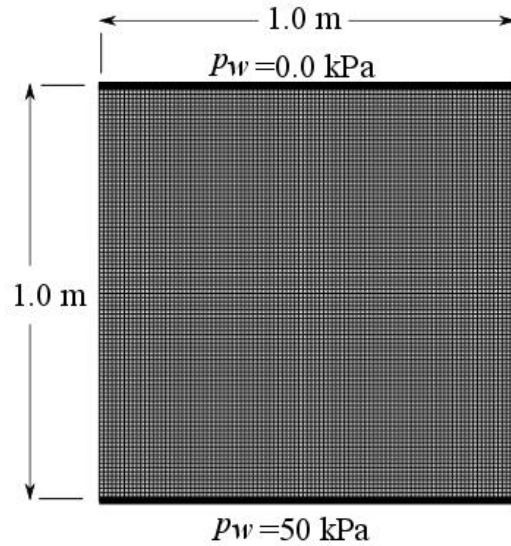


Ilustración 45 Geometría y condiciones de borde para modelo de ensayo de permeabilidad.

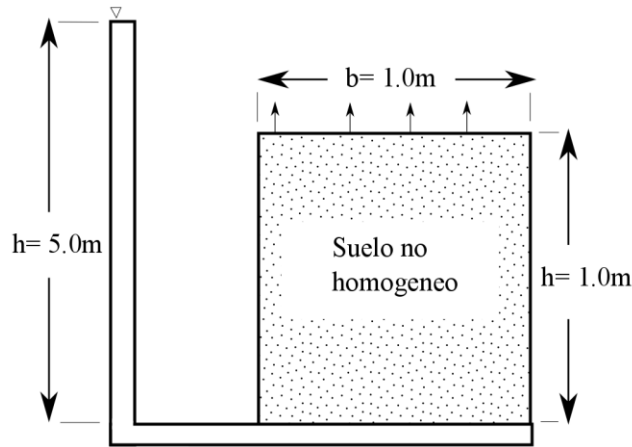


Ilustración 46 modelo esquemático de simulación de ensayo de permeabilidad (no está a escala).

A manera de ejemplo, en la *Ilustración 47* se observa la variación de la relación de vacíos en la geometría del modelo para un porcentaje de finos promedio de $\mu = 5\%$ y una desviación estándar de $\sigma = F \times \bar{\mu} = 0.5 \times 5\% = 2.5\%$.

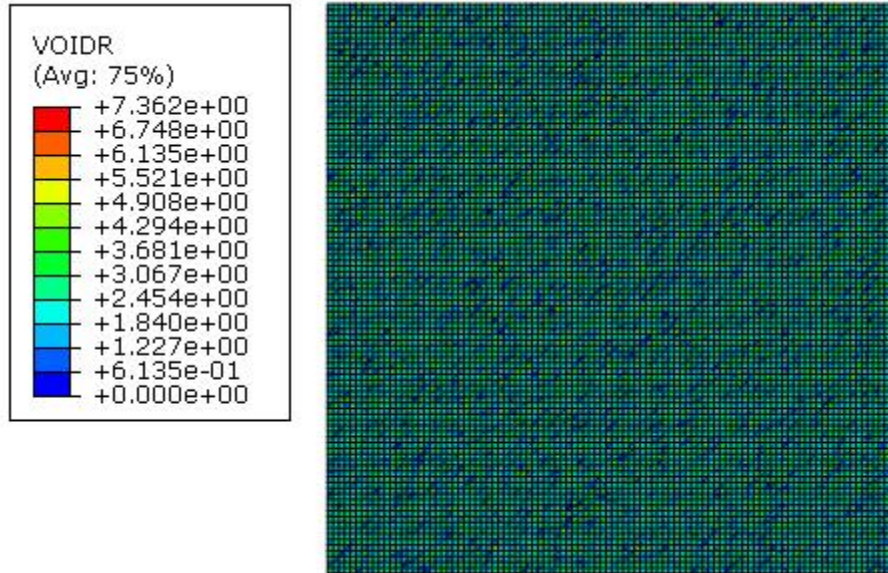


Ilustración 47 Distribución del porcentaje de finos en el problema 1: simulación de un ensayo de permeabilidad. porcentaje de finos promedio de $\mu = 5\%$ y una desviación estándar de $\sigma = F \times \bar{\mu} = 0.5 \times 5\% = 2.5\%$.

8.3 Descripción del problema simulando flujo alrededor de tablestaca

Se describe a continuación el problema de valor de contorno de flujo bidimensional alrededor de tablestaca. Para la simulación de la tabla estaca se consideró una geometría de dimensiones: 20 m de ancho y 6 m de alto. Se utilizó una tabla estaca de 3.0 m de alto y 0.20 m de espesor la cual es considerada como una condición de borde impermeable. Se restringieron todos los desplazamientos en los nodos y se le asignaron 2 condiciones de borde de presión de agua, en la parte superior izquierda del modelo se consideró $p_w = 0.0$ kPa, en la parte superior derecha se consideró $p_w = 100.0$ kPa. La configuración de la geometría del modelo y sus condiciones de borde se pueden apreciar en la Ilustración 48.

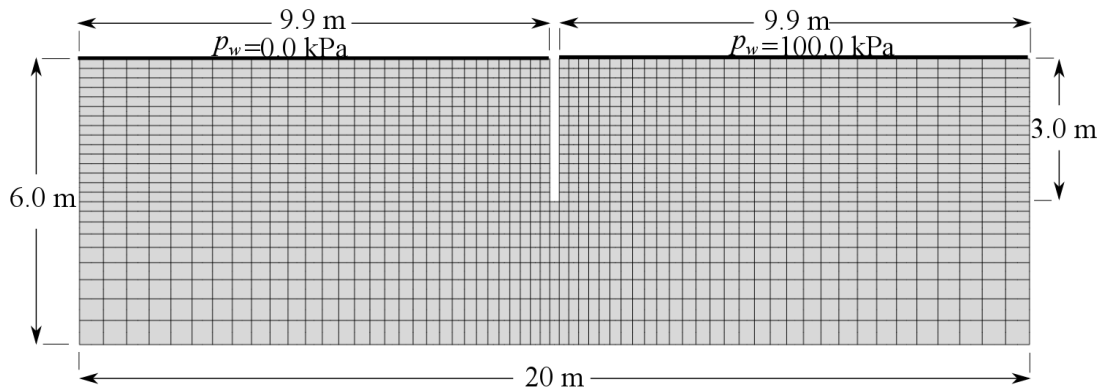


Ilustración 48 Geometría y condiciones de borde para modelo de tabla estaca.

8.4 Resultados

Para el modelo del ensayo de permeabilidad (ver Ilustración 45 e Ilustración 46) se calculó la permeabilidad efectiva del sistema. Partiendo de la ley de Darcy.

$$Q = k^{ef} i A \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde el área $A = 1 \times 1 \text{ m}^2$, el gradiente hidráulico con $\Delta h = 50 \text{ kPa} / \gamma_w = 5 \text{ m}$ y $h = 1 \text{ m}$ es de $i = \frac{\Delta h}{h} = 5 \text{ m} / 1 \text{ m} = 5$. Con esto, el caudal Q se calcula como:

$$Q = k^{ef}(5) \quad \text{Ecuación 14}$$

De igual manera el caudal se define como:

$$Q = \bar{v} A \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde \bar{v} es la velocidad media del agua en el borde donde el agua sale (borde superior). Para esto, se calculan todas las velocidades del agua en este borde y se promedian. Igualando estas 2 ecuaciones se tiene que la permeabilidad efectiva del sistema es igual a:

$$k^{ef} = \frac{\bar{v}}{\Delta h} \quad \text{Ecuación 16}$$

Los resultados de las simulaciones del ensayo de permeabilidad para porcentajes de finos variables de 2%, 5% y 10 % entre la Ilustración 49 e Ilustración 57.

Los resultados muestran que la permeabilidad presenta una variación significativa con respecto a la distribución inicial del porcentaje de finos. De manera general se puede afirmar que para promedios de contenido de finos bajos, por ejemplo $\mu = 2\%$, la permeabilidad equivalente resultante y la velocidad promedio resultante presentan un pico para un factor $F=0.3$ aproximadamente, véase desde la Ilustración 49 hasta Ilustración 51 respectivamente. Para promedios de contenido de fino mayores, por ejemplo $\mu = 5\%$ y $\mu = 10\%$, la permeabilidad equivalente resultante y la velocidad promedio resultante tiene a subir con el factor de desviación estándar, véase desde la Ilustración 52 hasta Ilustración 57.

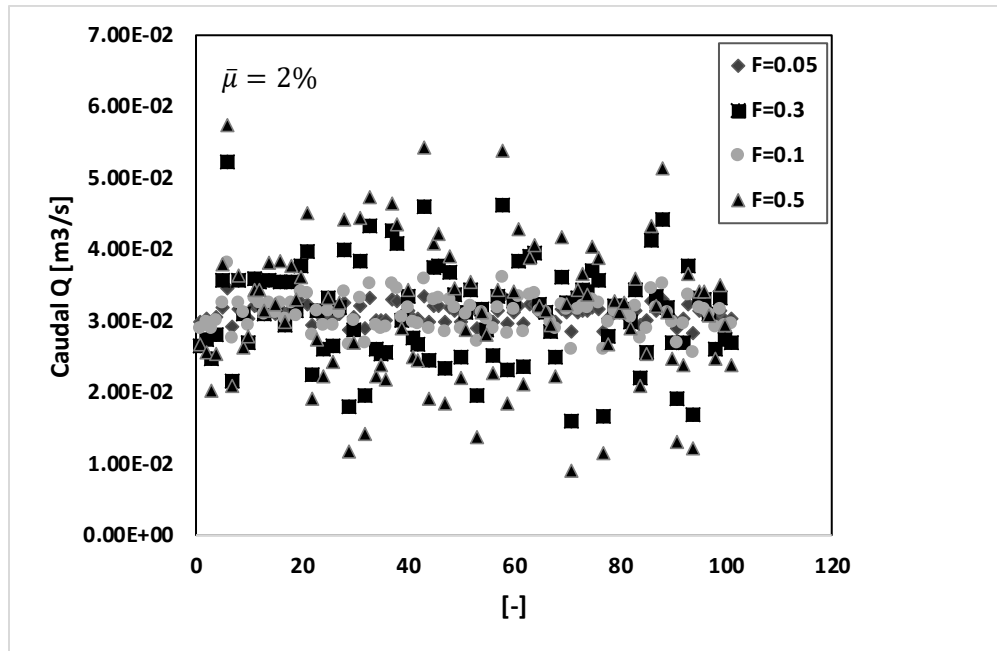


Ilustración 49 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 2%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

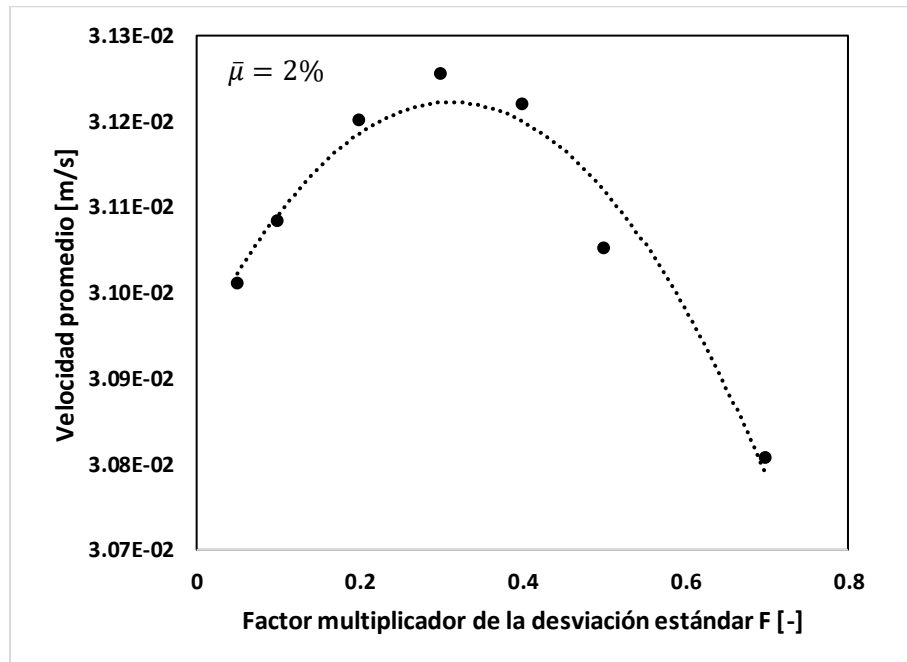


Ilustración 50 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =2%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

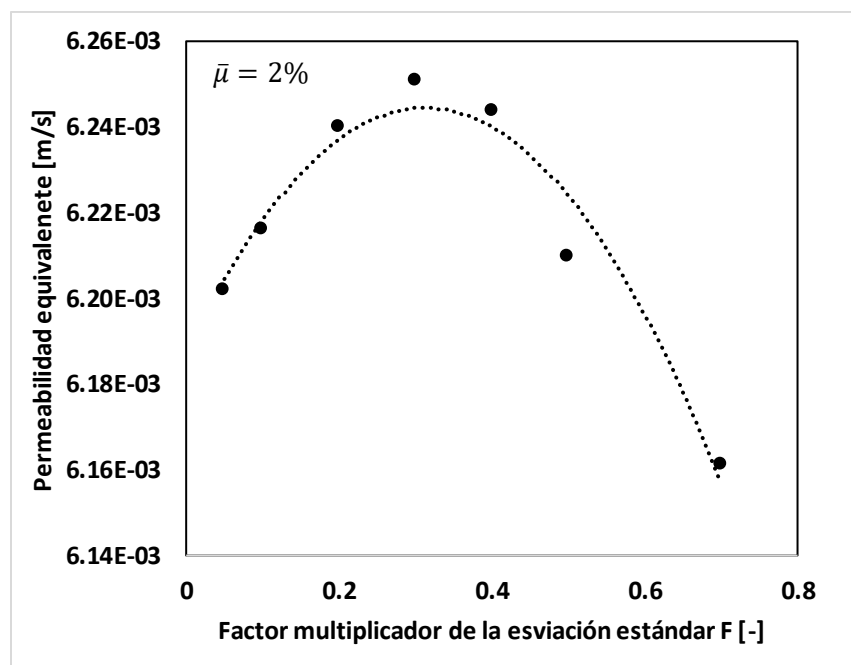


Ilustración 51 Permeabilidad equivalente para cada desviación estándar para porcentaje de finos =2%. F : factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

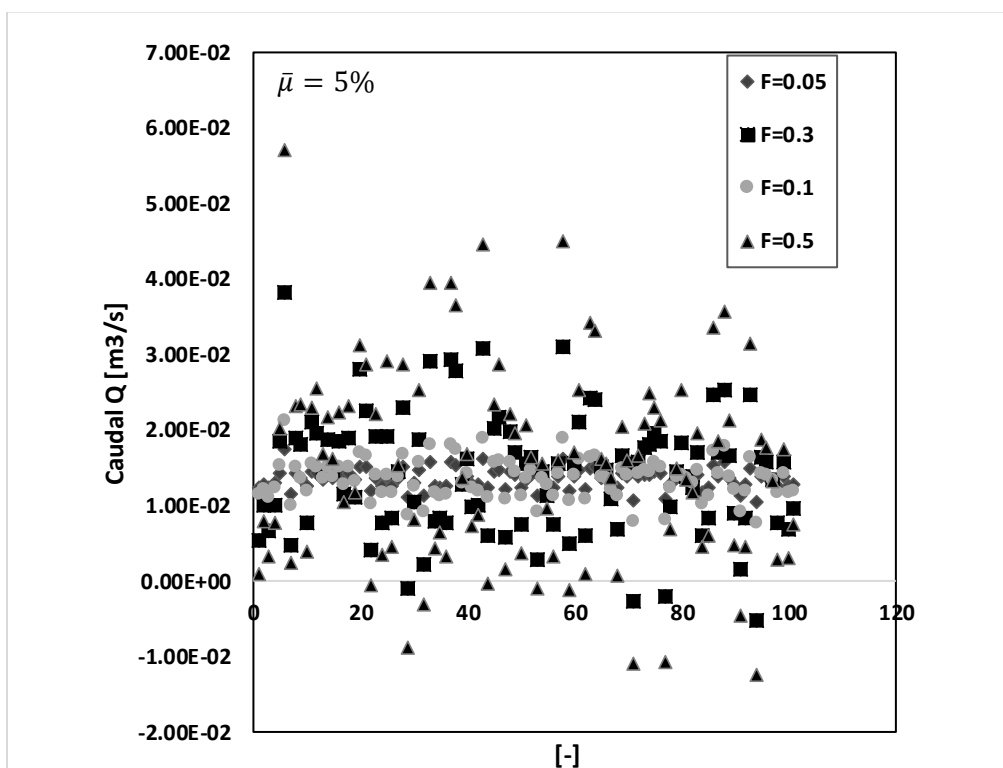


Ilustración 52 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 5%. F : factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

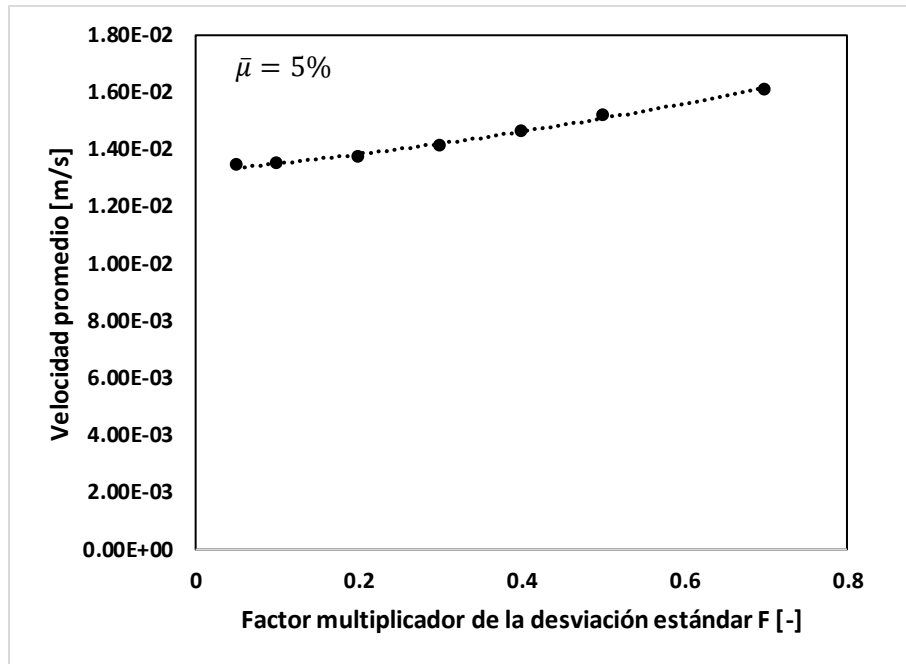


Ilustración 53 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

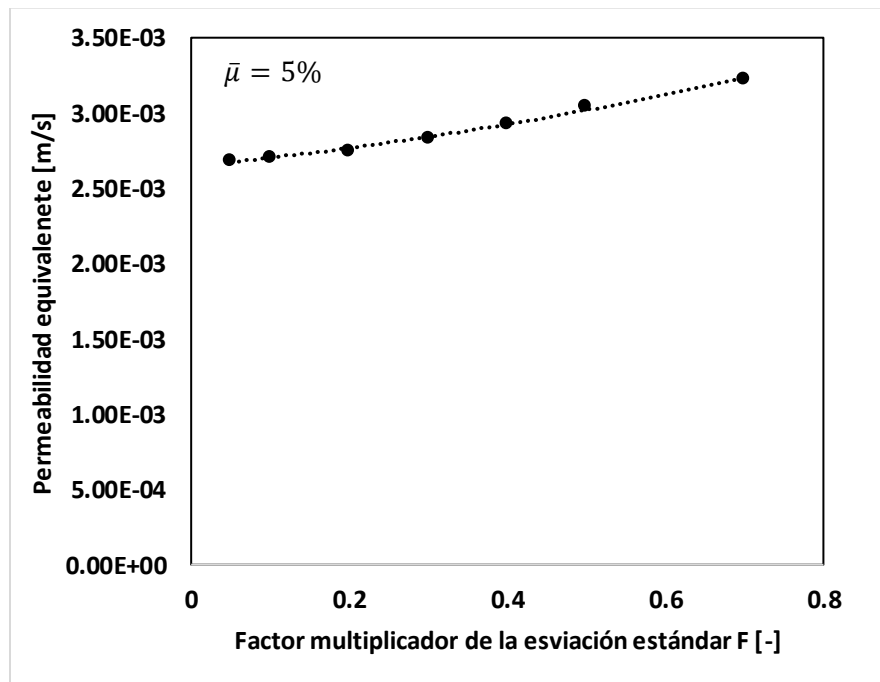


Ilustración 54 Permeabilidad equivalente para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

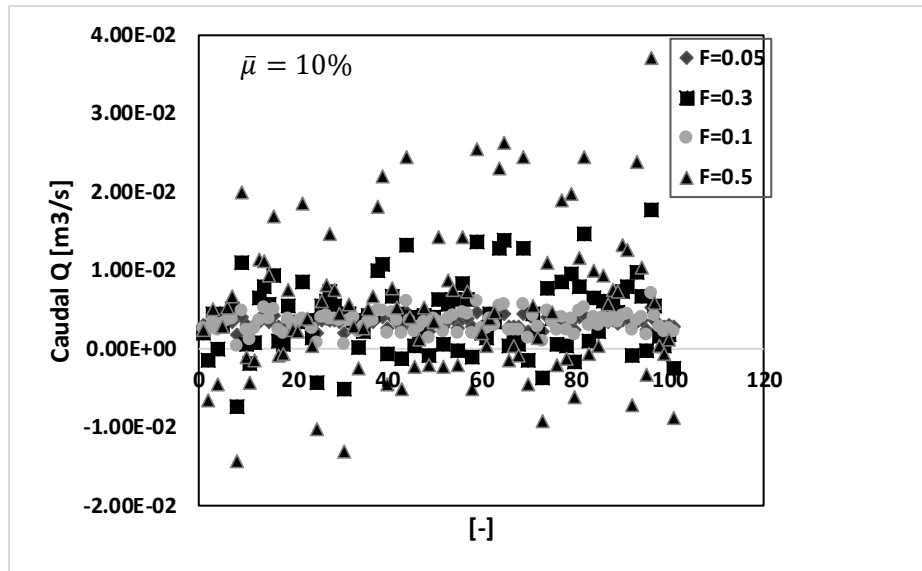


Ilustración 55 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 10%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

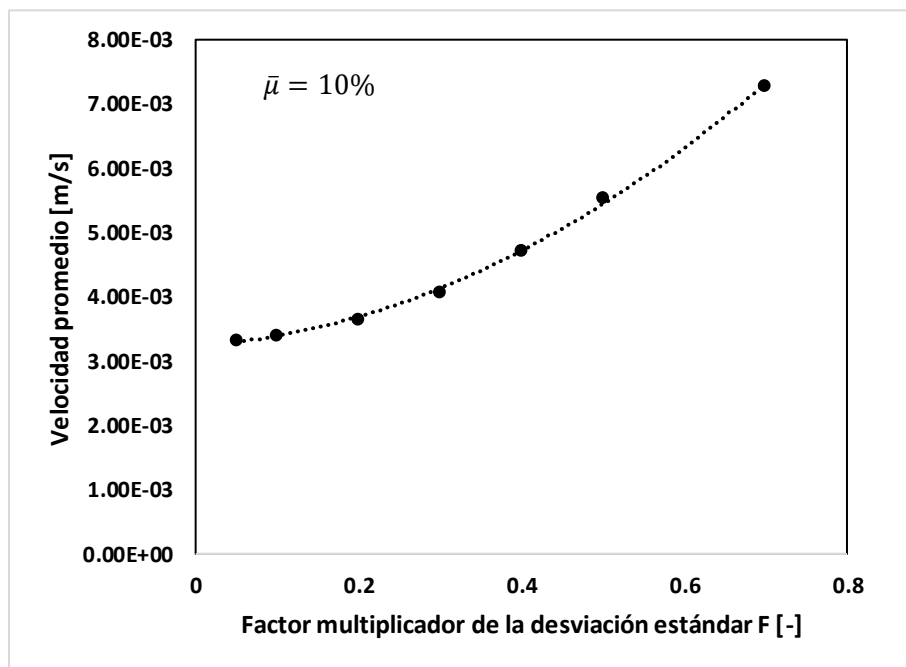


Ilustración 56 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =10%. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

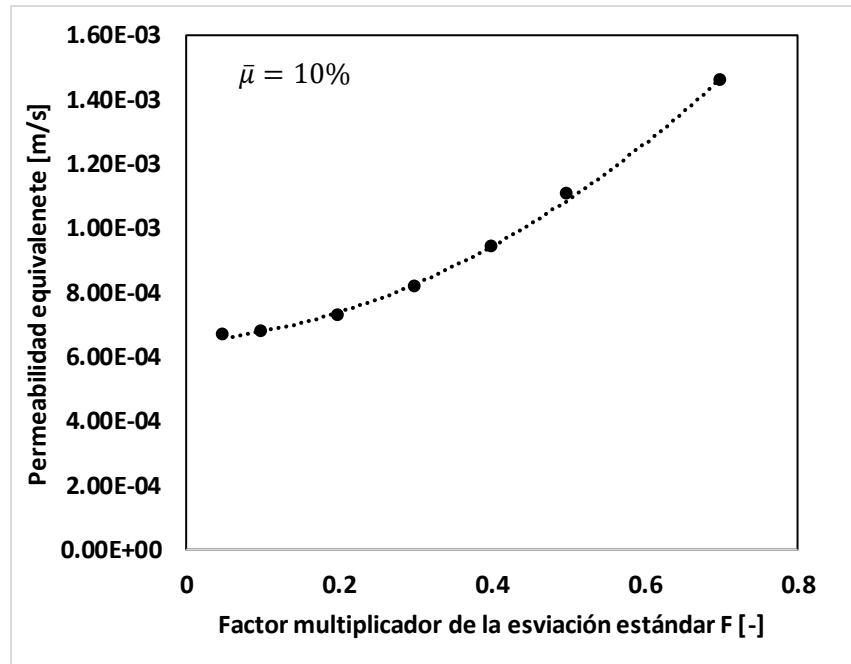


Ilustración 57 Permeabilidad equivalente para cada desviación estándar para porcentaje de finos =10%. F : factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de la tabla estaca para un porcentaje de finos de 5 %. Se usó el mismo código en FORTRAN para variar aleatoriamente el contenido de finos de la misma manera que se hizo en el ensayo de permeabilidad.

La Ilustración 58 muestra la distribución aleatoria del porcentaje de finos en el modelo de la tabla estaca. La Ilustración 59 presenta los contornos de presión de poros p_w y la Ilustración 60 presenta los contornos del exceso de presión de poros $\Delta p_w = p_w - p_{w0}$, en donde p_{w0} es la presión de poros inicial.

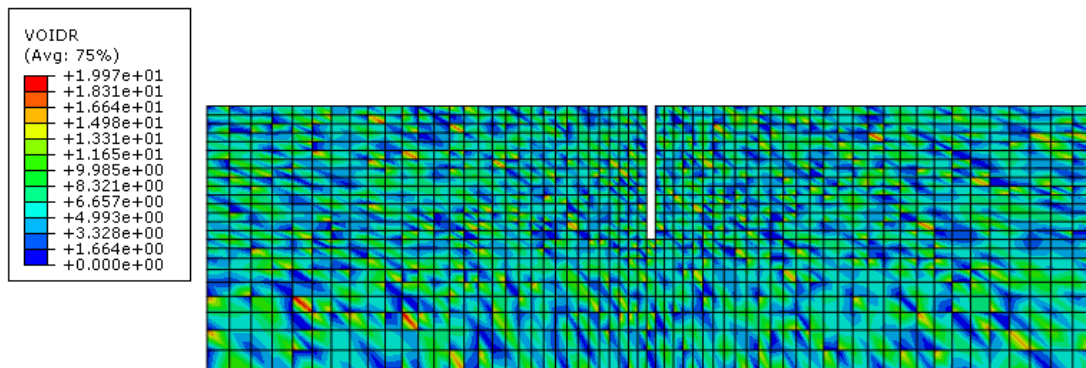


Ilustración 58 Distribución aleatoria de contenido de finos en el modelo de la tabla estaca con porcentaje de finos de $\bar{\mu} = 5\%$ y factor multiplicador de la desviación estándar de 0.9

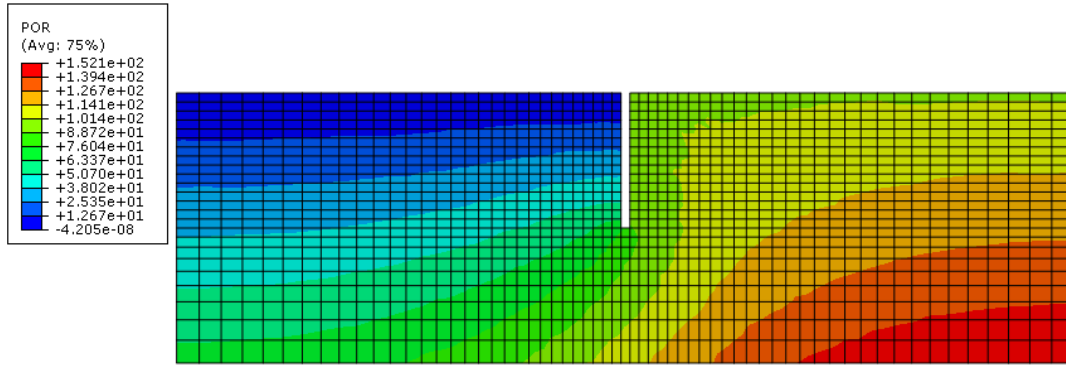


Ilustración 59 Presión de poros modelo de la tabla p_w estaca con porcentaje de finos de 5% y factor multiplicador de la desviación estándar de $F=0.9$

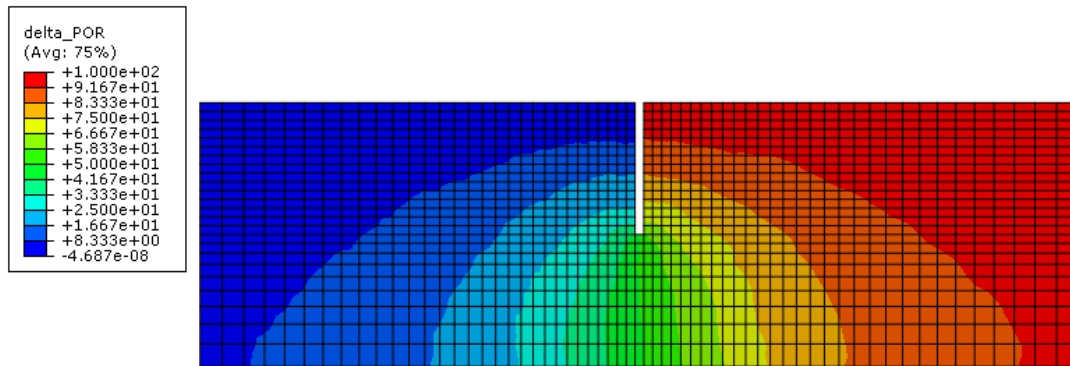


Ilustración 60 Variación del exceso presión de poros $\Delta p_w = p_w - p_{w0}$ en el modelo de tabla estaca con porcentaje de finos de 5% y factor multiplicador de la desviación estándar de $F=0.9$

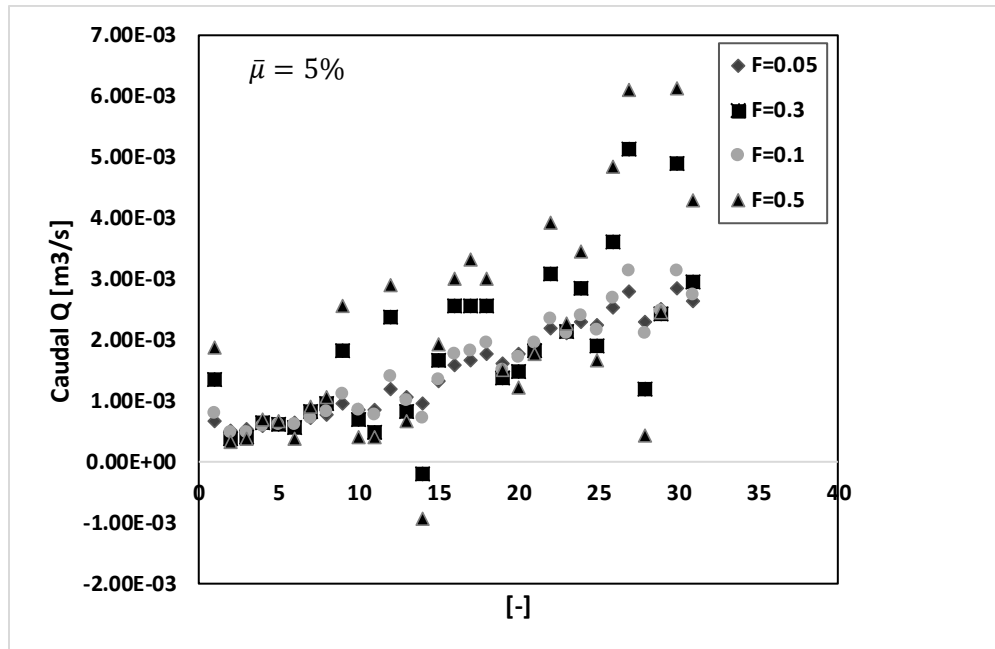


Ilustración 61 Grafico de dispersión del caudal calculado para porcentaje de finos = 5% Modelo de la tabla estaca. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

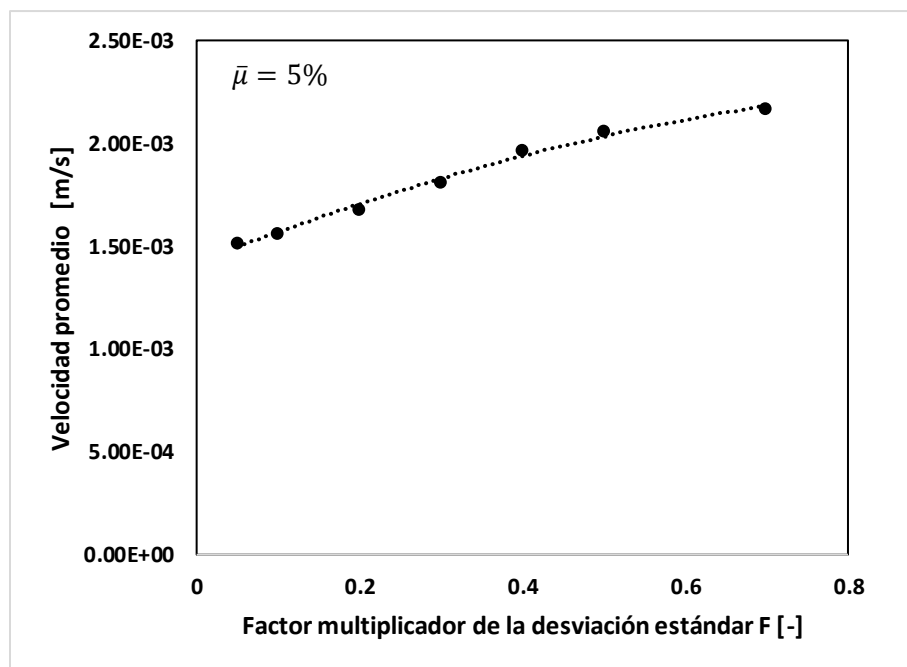


Ilustración 62 Velocidad promedio medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5% Modelo de la tabla estaca. F: factor multiplicador de la desviación estándar $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

La Ilustración 62 muestra la velocidad promedio de las 2 simulaciones normalizada sobre la velocidad promedio inicial v_0 para un factor multiplicador de $F = 0$ (desviación estándar $\sigma = 0$) con porcentaje de finos $\bar{\mu} = 5\%$. Se observa una un comportamiento similar en ambas simulaciones descrito por la línea de tendencia mostrada.

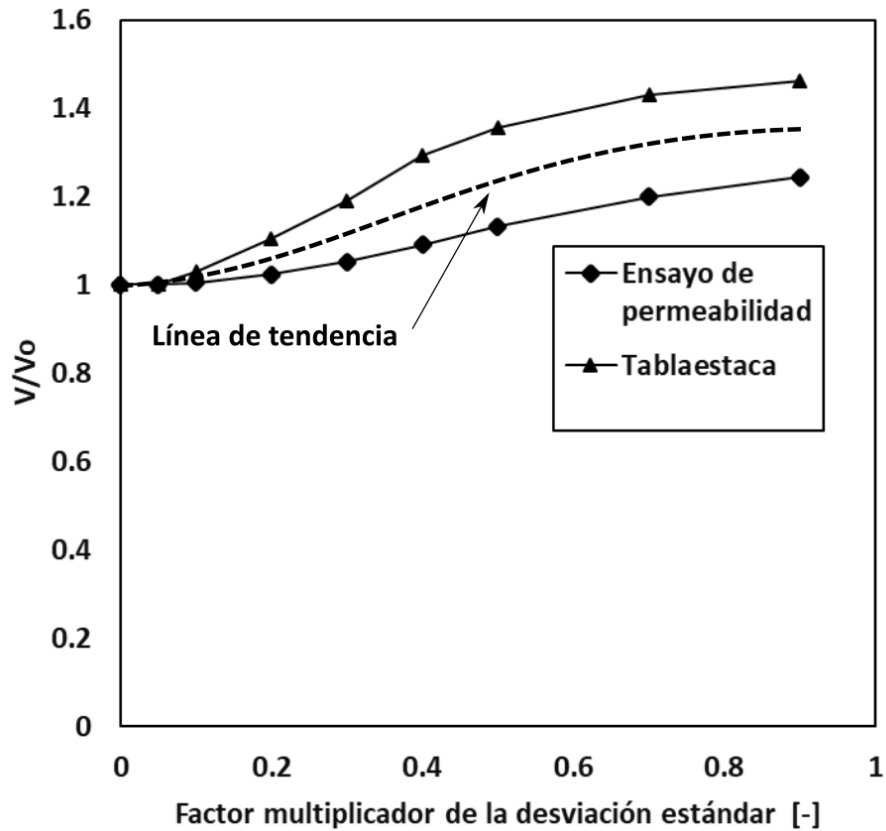


Ilustración 62 Velocidad promedio normalizada de las 2 simulaciones medida para cada desviación estándar para porcentaje de finos =5%. F: factor multiplicador de la desviación estándar
 $\sigma = F \times \bar{\mu}$, en donde $\bar{\mu}$ es el promedio

9 CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se derivan del trabajo realizado. Los valores de permeabilidad obtenidos en el laboratorio, tanto con los permeámetros tradicionales como con la Celda de Rowe se aproximaron en la mayoría de los casos a los valores típicos encontrados en la revisión de la literatura, es decir, entre un rango de $1, E-02$ y $1, E-03$ para arenas finas y valores menos a $1, E-06$ para arcillas (Das, 2001). En otros casos, se encontraron diferencias hasta de dos órdenes de magnitud, en especial con la celda de Rowe, lo que sugiere una mayor investigación con este equipo para determinar posibles fuentes de errores aun no conocidas. Como era de esperarse las curvas de permeabilidad mostraron una relación decreciente con el contenido de finos de las mezclas de materiales areno arcillosos; es decir, a medida que aumentaba el contenido de finos en la mezcla, disminuía la permeabilidad de la muestra de suelo.

Por otra parte, en los ensayos realizados con la Celda de Rowe fue posible garantizar la saturación completa de la muestra mediante la obtención del parámetro B de Skempton que para el caso específico de la arcilla tipo caolín fue muy cercano a 1 en un periodo muy corto de tiempo (aproximadamente 30 minutos). De lo anterior es de resaltar que la utilización de la celda de Rowe permitió garantizar la completa saturación de la muestra. Por otro lado, no se tienen mediciones reales de la saturación de las muestras con permeámetros, por lo tanto, su grado de saturación aun es desconocido.

Al poder incrementar la presión ejercida a la muestra por medio de la celda de Rowe (Hidrocom) se obtuvieron resultados muy coherentes al observarse que, a mayor gradiente hidráulico, se incrementaba la presión de confinamiento en la muestra y por lo tanto la permeabilidad tiende a disminuir.

A través de los ensayos realizados se pretendió cuantificar el efecto de la migración de finos. Se pudo concluir que estos valores se ven afectados por el tipo de montaje que se utilice para la realización de los ensayos y sobre todo por la tubificación que se presenta para mezclas de 50% - 50% de materiales areno arcillosos. Los resultados obtenidos muestran que la migración de finos no es significativa para gradientes hidráulicos bajos.

Se realizaron finalmente simulaciones numéricas con elementos finitos para analizar el comportamiento de la permeabilidad equivalente con respecto a distribuciones aleatorias de porcentajes de fino. Los resultados mostraron que a menor desviación estándar el resultado es similar al de un suelo homogéneo con las mismas características, pero al usarse una distribución normal con media en el porcentaje de finos deseados y desviación estándar variable desde 0.05 hasta 0.9 se observa una tendencia de aumento de la permeabilidad equivalente.

10BIBLIOGRAFIA

- Al-Tabbaa, A., & Wood, D. M. (1987). Some measurements of the permeability of kaolin. *Géotechnique*, 37(4), 499–503. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.4.499>
- Alyamani, M. S., & Şen, Z. (1993). Determination of Hydraulic Conductivity from Complete Grain-Size Distribution Curves. *Groundwater*, 31(4), 551–555. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00587.x>
- Arulanandan, K., & Perry, E. B. (1983). Erosion in relation to filter design criteria in earth dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(5), 682–698. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:5\(682\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:5(682))
- Babić, B., Prager, A., & Rukavina, T. (2000). Effect of fine particles on some characteristics of granular base courses. *Materials and Structures*, 33(September), 419–424. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02480660>
- Bardet, J.-P. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. Pearson.
- Belkhatir, M., Schanz, T., Arab, A., & Della, N. (2014). Experimental Study on the Pore Water Pressure Generation Characteristics of Saturated Silty Sands. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(8), 6055–6067. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1238-9>
- Belkhatir, M., Schanz, T., Arab, A., Della, N., & Kadri, A. (2014). Insight into the effects of gradation on the pore pressure generation of sand-silt mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 37(5). <https://doi.org/10.1520/GTJ20130051>
- Bhatnagar, P. L., Gross, E. P., & Krook, M. (1954). A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems. *Physical Review*, 94(3), 511–525. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.511>
- Bowles, J. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. McGraw-Hill.
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 787–795. <https://doi.org/10.1139/t04-022>
- Das, B. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Journal of Chemical Information and Modeling. Cengage learning. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Dassault Systèmes. (2016). Abaqus Theory manual 6.14.
- Davis, B. (1986). An Improved Importance Sampling Method for Digital Communication System Simulations. *IEEE Transactions on Communications*, 34(7), 715–719. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1986.1096598>
- DeGroot, D. J., Ostendorf, D. W., & Judge, A. I. (2012). In situ measurement of hydraulic conductivity of saturated soils. *Geotechnical Engineering*, 43(4), 63–72.

- Deng, Y., Wu, Z., Cui, Y., Liu, S., & Wang, Q. (2017). Sand fraction effect on hydro-mechanical behavior of sand-clay mixture. *Applied Clay Science*, 135(Supplement C), 355–361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.017>
- Farrance, W. (n.d.). Instruction Manual Hydrocon hydraulic oedometer.
- Fuentes, W. M. (2014). *Contributions in mechanical modelling of fill materials*. PhD Thesis. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Hazen, A. (1911). Discussions of dams on sand foundations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, LXXIII(3), 190–207.
- Head, K. H., & Epps, R. (2014). *Manual of Soil Laboratory Testing: Volume III: Effective Stress Tests, Third Edition*.
- Hidalgo Mejia, J. (2007). *Consolidación De Suelos Visco – Plásticos: generacion de presion de poro y deformaciones diferidas*. Tesis de maestria En Ingeniería (Geotecnia). Universidad nacional autonoma de mexico.
- Holtz, R., Kovacs, W., & Sheahan, T. (2011). *Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson.
- Indrawan, I. G. B., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2006). Effects of coarse-grained materials on properties of residual soil. *Engineering Geology*, 82(3), 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.003>
- INVIAS. (2013). Sección 200. *Manual de Normas de Ensayos de Materiales Para Carreteras*, 342.
- Jabro, J. D. (1992). Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle-size distribution and bulk-density data . *Transactions of the Asae*, 35(2), 557–560. <https://doi.org/10.13031/2013.28633>
- Kenney, T. C., Lau, D., & Ofoegbu, G. I. (1984). Permeability of compacted granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4), 726–729. <https://doi.org/10.1139/t84-080>
- Khilar, B. K. C., Fogler, H. S., & Gray, D. H. (1985). Model for piping-plugging in earthen structures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1(7), 833–846. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:7\(833\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:7(833))
- Li, Y., LeBoeuf, E. J., Basu, P. K., & Mahadevan, S. (2005). Stochastic modeling of the permeability of randomly generated porous media. *Advances in Water Resources*, 28(8), 835–844. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.01.007>
- Loudon, a. G. (1952). The Computation of Permeability from Simple Soil Tests. *Géotechnique*, 3(4), 165–183. <https://doi.org/10.1680/geot.1952.3.4.165>
- Lu, D., & Yao, K. (1988). IMPROVED IMPORTANCE SAMPLING TECHNIQUE FOR EFFICIENT SIMULATION OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 6(1), 67–75. <https://doi.org/10.1109/49.192731>

- Lu, Z., & Zhang, D. (2003). On importance sampling Monte Carlo approach to uncertainty analysis for flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 26(11), 1177–1188. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(03\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(03)00106-4)
- Marot, D., Bendahmane, F., Rosquoet, F., & Alexis, A. (2009). Internal flow effects on isotropic confined sand-clay mixtures. *Soil and Sediment Contamination*, 18(3), 294–306. <https://doi.org/10.1080/15320380902799524>
- Mesri, G., & Olson, R. E. (1971). Mechanisms controlling the permeability of clays. *Clays and Clay Minerals*, 19(3), 151–158. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1971.0190303>
- Moffat, R. A., & Fannin, R. J. (2006). A large permeameter for study of internal stability in cohesionless soils. *Geotechnical Testing Journal*, 29(4), 273–279. <https://doi.org/10.1520/GTJ100021>
- Nagaraj, T. S., Pandian, N. S., & Narashimha Raju, P. S. R. (1993). Stress state-permeability relationships for fine-grained soils. *Géotechnique*, 43(2), 333–336. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.2.333>
- Nagaraj, T. S., Pandian, N. S., & Raju, P. S. R. N. (1994). Stress-state—permeability relations for overconsolidated clays. *Géotechnique*, 44(2), 349–352. <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.2.349>
- Odong, J. (2007). Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *Journal of American Science*, 3(3), 54–60. <https://doi.org/10.7537/marsjas040108.01>
- Roque, C., Chauveteau, G., Renard, M., Thibault, G., Bouteca, M., & Rochon, J. (1995). Mechanisms of Formation Damage by Retention of Particles Suspended in Injection Water. In *SPE European Formation Damage Conference*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/30110-MS>
- Shafiee, A. (2008). Permeability of compacted granule-clay mixtures. *Engineering Geology*, 97(3–4), 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.002>
- Shakoor, A., Cook, B. D. (1990). The effect of stone content, size and shape on engineering. *Association of Engineering Geologists*, (27), 245–253.
- Shelley, T. L., & Daniel, D. E. (1993). Effect of Gravel on Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(1), 54–68. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:1\(54\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(54))
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., & Stalin, V. K. (2000). Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2), 406–413. <https://doi.org/10.1139/t99-120>
- Tavenas, F., Leblond, P., Jean, P., & Leroueil, S. (1983). The permeability of natural soft clays. Part I: Methods of laboratory measurement. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 629–644. <https://doi.org/10.1139/t83-072>
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: J. Wiley and Sons; London:

Chapman and Hall.

- Watabe, Y., Yamada, K., & Saitoh, K. (2011). Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite. *Géotechnique*, 61(3), 211–219. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.087>
- Yang, Y., & Aplin, A. C. (1998). Influence of lithology and compaction on the pore size distribution and modelled permeability of some mudstones from the Norwegian margin. *Marine and Petroleum Geology*, 15(2), 163–175. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00008-7)
- Yang, Y., & Aplin, A. C. (2007). Permeability and petrophysical properties of 30 natural mudstones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(3). <https://doi.org/10.1029/2005JB004243>
- Yang, Y., & Aplin, A. C. (2010). A permeability-porosity relationship for mudstones. *Marine and Petroleum Geology*, 27(8), 1692–1697. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.001>

11 ANEXOS

11.1 Protocolo celda de Rowe – Hidrocom

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción – Universidad del Norte.

Suministro de Agua Destilada hacia el tanque Reservorio

Conectar Bomba de vacío a **V1**.

Conectar Tanque de agua destilada a **V4**.

Encender la Bomba de vacío

V4.: ON

V1.: ON Hasta que llene el tanque de agua destilada

V2.: OFF

Leer 0 KPa en el manómetro digital.

“Cierre Total”

Llenado Bladder 1 (B1)

Sistema despresurizado (Verificar que el manómetro digital marque cero, de lo contrario inicializar en ceros).

V3.: ON

V5.: ON

V9.: ON

V12.: ON

V2.: ON un poco y lentamente para permitir el flujo de agua

Abrir rebosadero de B1, cuando el agua rebose, cerrar nuevamente el rebosadero del B1.

“Cierre Total”

Llenado Bladder 2 (B2)

Sistema despresurizado (Verificar que el manómetro digital marque cero, de lo contrario inicializar en ceros).

V3.: ON

V5.: ON

V8.: ON

V10.: ON

V2.: ON un poco y lentamente para permitir el flujo de agua

Abrir rebosadero de B2, cuando el agua rebose, cerrar nuevamente el rebosadero del B2.

“Cierre Total”

Procedimiento de Saturación Inicial de la Muestra sin Contrapresión

“Saturación Cámara”

V3.: ON

V5.: ON

V9.: ON

V13.: ON

V14.: ON

V2.: ON Girar lentamente un poco para liberar vacío y permitir el flujo de agua.

Abrir el rebosadero de la celda de Rowe hasta que rebose el agua destilada. Y luego cerrar

Cierre total

“Saturación Muestra” (Sin contrapresión)

V3.: ON

V5.: ON

V8.: ON

V11.: ON

V17.: ON

V15.: ON

V2.: ON Girar lentamente un poco para liberar vacío y permitir el flujo de agua.

Desconectar manguera azul en la Celda de Rowe (por el lado de la tapa), hasta que rebose el agua destilada. Hacer pasar el agua aproximadamente 2 min (flushing).

V15.: OFF (conectar la manguera azul)

Cierre total menos V3. Esta puede permanecer abierta todo el ensayo.

Aplicación de Contra-Presión y Cálculo del parámetro B

En la saturación se busca que todos los poros de la muestra estén llenos de agua, en el laboratorio se puede lograr esto sumergiendo la muestra por un tiempo, o aplicando una Contrapresión.

En los siguientes pasos se describe el procedimiento de saturación por aplicación de contrapresión:

La saturación por la aplicación de incrementos de contrapresión es usualmente necesaria para muestras de suelo de baja permeabilidad. La saturación es aceptada si se obtiene $B \geq 0.95$ (Parámetro B de Skempton).

Donde (Bishop & Henkel, 1962) $B = \frac{\Delta U}{\Delta \sigma_3}$

Se debe tener en cuenta que la muestra siempre debe estar a menor presión que la cámara.

Ejemplo:

Para someter la muestra a $\sigma' = 5$ KPa. Se puede suministrar 40 KPa a la cámara y 35 KPa a la muestra.

Partiendo del sistema de mangueras totalmente saturado y purgados; los transductores conectados y el sistema de válvulas totalmente cerrado.

En la celda deben estar conectadas las mangueras así:

Verificar que todas las válvulas estén cerradas.

V14. Con **V13.** Interfase B1

V17. Con V11. Interfase B2

Procedimiento

Abrir perilla de suministro de aire

1. (Bladder 1 = 40 KPa) Cámara - Carga

V7.: ON

V12.: ON

V9.: ON

P1 = 40 KPa (Girar lentamente hasta alcanzar la presión deseada)

2. (“Carga Cámara” 40 KPa)

V13.: ON

V14. ON

3. **V12.: OFF**

Verifica

Leer Manómetro = 40 KPa

V12.: ON

V9.: OFF

4. (Bladder 2 = 35 KPa) Muestra – Contra presión

V6.: ON

V10.: ON

V8.: ON

P2 =35 KPa (Girar lentamente hasta alcanzar la presión deseada)

5. **V11.: ON**

V17. ON

V15. ON

Muestra Contra Presión = 35 KPa

6. **V10. B2-C: OFF**

Verifica

Leer Manómetro = 35 KPa

(Cierre Total: Todo menos V6, V7, V12, V13, V14 y V15).

Parámetro B

- Start Test, reset all zero (en el computador)
- Pasar manguera de **V17.** - **V16.**

1. Bladder 1: $\Delta\sigma = 35$ KPa

V13.: OFF

V14.: OFF

V9.: ON

P1.: +35 KPa (=75 KPa en la 1ra iteración)

2. “Pasar a Cámara”

V15.: Leer U_0 Sensor (computador)

V13.: ON

V14.: ON

3. **V15.:** “Lectura de U_1 ”

Leer en el sensor (computador)

Calcular $\Delta U = U_1 - U_0$

4. “Cálculo del parámetro B”

$$B = \frac{\Delta U}{\Delta\sigma}$$

Si $B < 0.90$ para suelos muy duros o $B < 0.95$ para suelos suaves a firmes— Seguir

5. “Contra – Presión” + 35 KPa

Cierre **V9. OFF**

V10.: ON

V8.: ON

P2.: +35 KPa (=70 KPa)

V11.: ON

V16.: ON

V8.: OFF

Cierre Total (menos **V6, V7, V12, V13, V14 y V15**)

Volver al paso 1.

Permeabilidad

Una vez alcanzado el valor de el parámetro B satisfactorio para el tipo de suelo a ensayar:

V15.:OFF

- Desconectar el sensor de Presión de Poros y conectar directamente en V15 la manguera que drenará en la probeta que permite la medición de volumen.
- Debe estar conectada directamente V11 con V16 en la Muestra
- Debe estar conectada V13 con V14 en la Cámara

V8.: ON

V10.: ON

V11.: ON

V16.: ON

Registrar el tiempo de inicio

- **V15.: ON**

Recolecta un volumen de agua determinado

- **V15.:OFF**

Registra tiempo de fin del ensayo

Desconecta y drena completamente la manguera de V15.

Lee volumen recolectado en el tiempo.

Calcula Permeabilidad k (cm/s), así:

$$k = \frac{Vol (cm^3) * Hmuestra (cm)}{t (seg) * A muestra (cm^2) * \Delta h (cm)}$$

Donde:

$Vol (cm^3) =$ Volumen recolectado en la probeta en el tiempo

$Hmuestra (cm) =$ Altura de la muestra

$t (s) =$ Tiempo medido de inicio a fin del experimento

$A muestra (cm^2) =$ Area de la sección transversal de la muestra

$\Delta h (cm) =$ cabeza de presión = $\frac{Presión muestra}{\gamma_{agua}} + Hmuestra$

Despresurización

1. "Muestra"

Cierre Total (menos **V6.** y **V7.**)

V10.: ON

V8.: ON

V11.: ON

V16.: ON

FLOW UP: OFF (By Pass)

Vol Ch.: OFF

P2.: 0 KPa Girar lentamente durante 1 min aproximadamente.

(Cierre Total: Todo menos V6. Y V7.)

2. "Cámara"

V12.: ON

V9.: ON

V13.: ON

V14.: ON

P1.: 0 KPa Girar lentamente durante 1 min aproximadamente.

Cierre total.

Protocolo Celda de Rowe – Hidrocom

Tabla 15 Nomenclatura de válvulas del sistema

VALVULAS	VALVES
V1. Válvula bomba de vacío	V1. Vacuum pump Valve
V2. Válvula disipación de vacío	V2. Vacuum dissipation Valve
V3. Válvula Reservorio	V3. Reservoir Valve
V4. Válvula suministro de agua destilada	V4. Supply Valve for distilled water
V5. Válvula salida de agua destilada	V5. Distilled water outlet Valve
V6. B2-A Válvula entrada de aire B2	V6. B2-A Air Inlet Valve B2
V7. B1-A Válvula entrada de aire B1	V7. B1-A Air Inlet Valve B1
V8. B2-B Válvula entrada de agua B2	V8. B2-B Water inlet Valve B2
V9. B1-B Válvula entrada de agua B1	V9. B1-B Water inlet Valve B1
V10. B2-C Válvula Bladder 2	V10. B2-C Bladder 2 Valve
V11. B2-D Válvula Muestra	V11. B2-D Sample Valve
V12. B1-C Válvula Bladder 1	V12. B1-C Bladder 1 Valve
V13. B1-D Válvula Cámara	V13. B1-D Camera Valve
V14. Válvula Cámara Carga	V14. Camera Valve (vertical pressure)
V15. Válvula Muestra-Contra Presión	V15. Back Pressure Valve
V16. Válvula Muestra Celda	V16. Sample Cell Valve
VA. Válvula suministro de agua a los Bladders	VA. Supply Valve for water to the Bladders

11.2 Ensayos caracterización de arena

CLASIFICACION USCS

Tabla 16 Calculo D_{10}

% Pasa	Log d	D10	Estimación lineal	
28,6	-0,523		B	A
8,7	-0,824		0,015	-0,956
10	-0,804	0,157	0,000	0,000

Tabla 17 Calculo D_{30}

% Pasa	Log d	D30	Estimación lineal	
39,9	-0,372		B	A
28,6	-0,523		0,013	-0,902
30	-0,504	0,313	0,000	0,000

Tabla 18 Calculo D_{60}

% Pasa	Log d	D60	Estimación lineal	
99,8	0,072		B	A
55,7	-0,222		0,007	-0,592
60	-0,193	0,641	0,000	0,000

11.3 Ensayos caracterización de caolín

Tabla 19 Distribucion de tamaño de las particulas de caolin según ensayo de hidrometro (T=21°C)

Time (min)	Reading (-)	Corrected reading (-)	WD1 (%)	L (cm)	L/t (cm/min)	Particle size d (mm)	Percent finer [-]
1	57	50	99,77	7	7	0,036	88,698
2	56	49	97,78	7,1	3,550	0,025	86,924
5	54	47	93,79	7,4	1,480	0,016	83,376
15	49	42	83,81	8,3	0,553	0,010	74,506
30	45	38	75,83	8,9	0,297	0,007	67,410
60	41	34	67,85	9,6	0,160	0,005	60,315
120	39	32	63,85	9,9	0,083	0,004	56,767
250	35	28	55,87	10,6	0,042	0,003	49,671
1440	32	25	49,89	11,1	0,008	0,001	44,349

Tabla 20 Datos ensayo gravedad especifica caolín

Variable	Value
Pycnometer nº (-)	1
Volume of pycnometer (cm^3)	500
Weight of pycnometer (g)	172,5
weight of pycnometer filled with oven dried soil (g)	272,8
Weight of oven dried soil (g)	100,3
weight of pycnometer filled with water and soil (g)	735,16
weight of pycnometer filled with water (g)	672,5
Temperature of the test (° C)	20,7
GS at test temperatura (-)	2,66
GS at 20 ° C (-)	2,66

11.4 Ensayo permeámetro de cabeza constante

Tabla 21 Ensayo permeámetro de cabeza constante para distintos contenidos de caolín

Kaolin content (%)	0	4	8	12	16
Soil sample	Arena de Santo Tomas				
Specific gravity G_s (-)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Oven dry sample weight (g)	805,20	805,20	805,20	805,20	805,20
Height of the sample (cm)	10,50	9,80	9,70	9,50	9,50
Diameter of the sample (cm)	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
Cross section area of the sample (cm^2)	44,18	44,18	44,18	44,18	44,18
initial voids ratio (-)	0,53	0,42	0,41	0,38	0,38
Oven dry unit weight (kN/m^3)	17,03	18,24	18,43	18,82	18,82

11.5 Ensayo celda de Rowe

100% Caolín

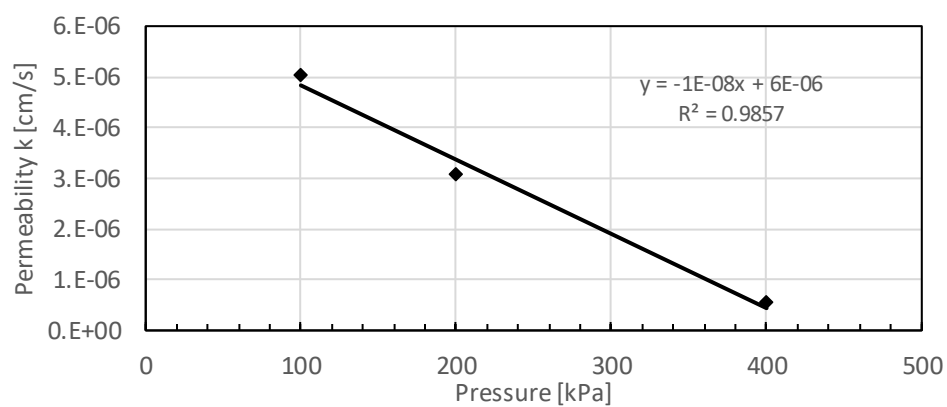


Ilustración 63 Variación de la permeabilidad con la presión-100% Caolín

20% Caolin-80% Arena

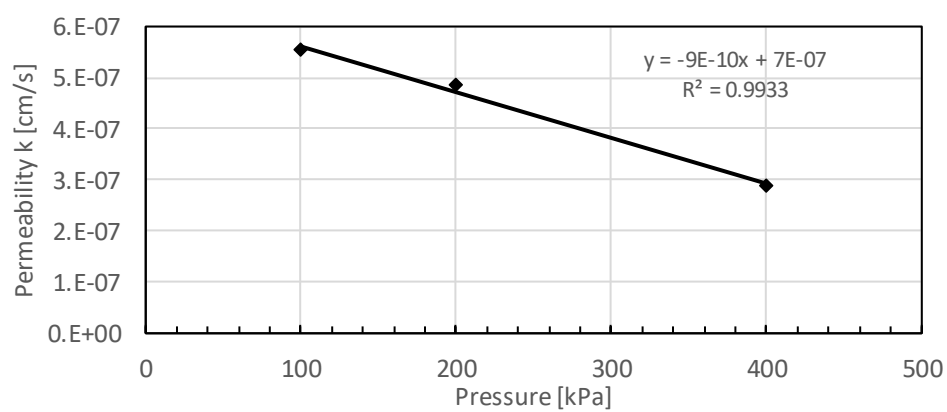


Ilustración 64 Variación de la permeabilidad con la presión-200% Caolín

4% Caolin-96% Arena

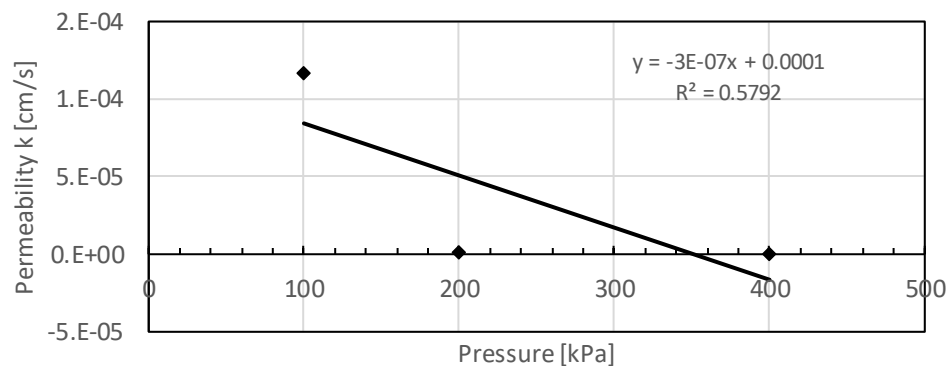


Ilustración 65 Variación de la permeabilidad con la presión-4% Caolín

Tabla 22 Ensayos celda de Rowe con distintos contenidos de caolín a 100 kPa

Date	17-nov	16-nov	21 de nov
Kaolin content (-)	4	20	100
Sand content (-)	96	80	0
Pressure Cámara (kPa)	100	100	100
Pressure of sample (kPa)	100	100	100
B (-)	1	1	1
Diameter of sample [cm]	9,9	9,9	9,9
Area of sample (cm2)	76,98	76,98	76,98
D h (cm)	1003,2	1003,2	1003,2
γ_w (kN/m ³)	10	10	10
Height of sample (cm)	3,2	3,2	3,2
Time (s)	1	25	1
Volume (cm3)	170	17	11,5
k permeability (cm/s)	1,17,E-04	4,70,E-07	7,94,E-06

Tabla 23 Ensayos celda de Rowe con distintos contenidos de caolín a 200 kPa

Date	17-nov	16-nov	21 de nov
Kaolin content (-)	4	20	100
Sand content (-)	96	80	0
Pressure Cámara (kPa)	200	200	200
Pressure of sample (kPa)	200	200	200
B (-)	1	1	1
Diameter of sample [cm]	9,9	9,9	9,7
Area of sample (cm2)	76,98	76,98	73,90
D h (cm)	2003,2	2003,2	2003,2
γ_w (kN/m ³)	10	10	10
Height of sample (cm)	3,2	3,2	3,2
Time (s)	180	300	60
Volume (cm3)	10	7	8,5
k permeability (cm/s)	1,15E-06	4,84E-07	3,06E-06

Tabla 24 Ensayos celda de Rowe con distintos contenidos de caolín a 400 kPa

Date	17-nov	16-nov	21 de nov
Kaolin content (-)	4	20	100
Sand content (-)	96	80	0
Pressure Cámara (kPa)	200	200	200
Pressure of sample (kPa)	200	200	200
B (-)	1	1	1
Diameter of sample [cm]	9,9	9,9	9,7
Area of sample (cm2)	76,98	76,98	73,90
D h (cm)	2003,2	2003,2	2003,2
γ_w (kN/m ³)	10	10	10
Height of sample (cm)	3,2	3,2	3,2
Time (s)	180	300	60
Volume (cm3)	10	7	8,5
k permeability (cm/s)	1,15E-06	4,84E-07	3,06E-06

11.6 Lavado de finos

50% Caolin-50% Arena

Tabla 25 Gradiente hidráulico para la muestra con 50% de finos

L sample (cm)	Δh (cm)	i (-)
4,7	108	22,98

Tabla 26 Resultados ensayo de lavado de finos para 50% de caolín

Time (min)	Weight lecture of kaolin (g)	Cumulative weight of kaolin (g)	Water volume (cm3)	Cumulative water volume (ml)	Concentration (g/cm3)
0	0	0	0	0	0
10	0,3	0,3	30	30	0,0100
30	0,1	0,4	50	80	0,0050
60	0,1	0,5	65	145	0,0034
120	0	0,5	80	225	0,0022

30% Caolin-70% Arena

Tabla 27 Gradiente hidráulico para la muestra con 30% de finos

L sample (cm)	Δh (cm)	i (-)
4	108	27

Tabla 28 Resultados ensayo de lavado de finos para 30% de caolín

Time (min)	Weight lecture of kaolin (g)	Cumulative weight of kaolin (g)	Water volume (cm3)	Concentration (g/cm3)
0	0	0	0	0
10	0,1	0,1	0,04	2,48
30	0,1	0,2	0,12	1,65
60	0	0,2	0,24	0,83

20% Caolin-80% Arena

Tabla 29 Gradiente hidráulico para la muestra con 20% de finos

L sample (cm)	Δh (cm)	i (-)
4	108	27

Tabla 30 Resultados ensayo de lavado de finos para 20% de caolín

Time (min)	Weight lecture of kaolin (g)	Cumulative weight of kaolin (g)	Water volume (cm3)	Concentration (g/cm3)
0	0	0	0	0
10	0,1	0,1	0,49	0,20
30	0,1	0,2	1,47	0,14
60	0	0,2	2,93	0,07

11.7 Modelación numérica

Código desarrollado en el lenguaje de programación FORTRAN para asignar valores aleatorios a la relación de vacíos de los elementos usados en todas las simulaciones en Abaqus.

```
SUBROUTINE VOIDRI(EZERO,COORDS,NOEL)
  USE IFPORT
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
  integer noel
  real*8 ezero, aux1, aux2, dif, factor
  real*8 COORDS(3)
  promedio=2.0d0 ! promedio de relacion de vacios
  factor=0.5
  sigma=factor*promedio ! desviación estandar de relacion de vacios , factor=0.05, 0.1, 0.2, 0.3,0.4,0.5
  call rgauss(sigma, aux1,aux2)
  ezero=promedio+aux1
  dif=promedio
  if (ezero.le.(promedio-dif)) then
c   write(*,*) "e menor a cero =", ezero
    ezero=promedio-dif+0.01
  endif
  if (ezero.ge.(promedio+dif)) then
c   write(*,*) "e menor a cero =", ezero
    ezero=promedio+dif-0.01
  endif
  RETURN
END
```



```
SUBROUTINE rgauss(sigma, y1,y2)
USE IFPORT
real*8 x1, x2, w, y1, y2, sigma
do while ( (w .ge. 1.0d0).or.(w.eq.0.0d0) )
  x1 = 2.0d0 * rand(0) - 1.0d0
  x2 = 2.0d0 * rand(0) - 1.0d0
  w = x1 * x1 + x2 * x2
end do

w = sigma*sqrt( (-2.0d0 * log( w ) ) / w )
y1 = x1 * w
y2 = x2 * w
end subroutine rgauss
```